

MAG

01-22141

Mag.



* 01-221413+01 *

11/90

Wark

44-

Zur Kristallisation von 1 Rz Wasser
im Trockner ~ 700 WE

Seite 118, 134, 47

Das
Trocknen der Braunkohle
und
seine Wirtschaftlichkeit.

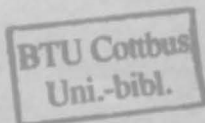
Von
Dr.-Ing. A. Eckardt.

Mit 13 in den Text gedruckten Abbildungen.



Halle a. S.
Druck und Verlag von Wilhelm Knapp.
1913.

Erhöhung der Wärmeübertrag. durch Steigerung der
Spannung und Temp. des Heißdampfes. Seite 56
Erwärmung Seite 61.



01-22141/51

Inhaltsverzeichnis.

| | Seite |
|---|-------|
| Verzeichnis durchlaufender Abkürzungen | V |
| Einleitung | I |
| I. Die Untersuchung von Trockenanlagen | 3 |
| A) Untersuchung des Dampf-Luftgemisches | 4 |
| B) Die Messung des Feuchtigkeitsgehaltes der Luft | 14 |
| C) Ausgeführte Untersuchungen | 36 |
| a) Millygrube bei Mückenberg, N.-L. | 40 |
| b) Brikettfabrik der Aktiengesellschaft Lauchhammer in Lauchhammer | 44 |
| II. Der Trockenvorgang | 48 |
| A) Die verschiedenen Faktoren | 48 |
| 1. Die Wärmezufuhr | 49 |
| 2. Die Erwärmung | 60 |
| 3. Die Verdampfung | 61 |
| 4. Die Trocknung | 71 |
| B) Versuche | 73 |
| III. Praktischer Teil | 99 |
| A) Der Betrieb von Trockenanlagen | 99 |
| B) Allgemeine Gesichtspunkte für eine zweckmäßige Gestaltung der Trocknung | 109 |
| 1. Die Dampfspannung | 110 |
| 2. Abmessungen der Apparate | 124 |
| 3. Rückgewinnung von Wärme | 133 |
| Anhang 1. Tabellen | 145 |
| Anhang 2. Verdunstungsversuche | 147 |
| Anhang 3. Hauptversuche | 148 |

Verzeichnis durchlaufender Abkürzungen ¹⁾.

- w* Wassergehalt in 1 kg Substanz.
S Spannung des Wasserdampfes in Millimeter Q.S. von 0°.
S₁ Maximalspannung des Wasserdampfes in Millimeter Q.S. von 0°.
S₂ Wirkliche Spannung des Wasserdampfes in Millimeter Q.S. von 0°.
S_d Freie Spannung in Millimeter Q.S. von 0°.
 γ Dampfdichte.
i'' Dampfwärme.
B Barometerstand in Millimeter Q.S. von 0°.
d Dampfgehalt in Gramm auf 1 kg trockene Luft.
t_s Taupunkt, Sättigungstemperatur.
J Wärmehalt von 1 kg Luft und *dg* Wasser bei Sättigung.
c_r Erforderliche Wärmemenge, um 1 kg Luft + *dg* Wasserdampf um 1° zu erwärmen.
v Volumen von 1 kg Luft und *dg* Wasser in Kubikmeter.
V Volumen in Kubikmeter.
Q Wärmemenge.
Q_k Der Kohle zugeführte Wärmemenge.
Q_l Der Luft zugeführte Wärmemenge.
Q_s Durch Strahlung zugeführte Wärmemenge.
X Verdampfte Wassermenge.
x Verdampfte Wassermenge auf 1 kg Rohgut.
M Menge der beteiligten Substanzen.
c_m Deren durchschnittliche spezifische Wärme.
 τ Temperatur der Heizfläche bezw. des Heißdampfes.
t Temperatur des Trockenguts.
 ϑ Temperatur der Luft.
 α Wärmeübergangszahl.
 \approx Zeit in Stunden.
F Fläche.
F_k Gegen Kohle wirksame Heizfläche.
F_l Gegen Luft wirksame Heizfläche.
F_{kl} Berührungsfläche von Kohle und Luft.
k_k Wärmedurchgangszahl gegen Kohle.
k_l Wärmedurchgangszahl gegen Luft.

1) Um die Anzahl der Abkürzungen möglichst zu beschränken, wurde in Fällen, wo eine Verwechslung ausgeschlossen erscheint, dieselbe Abkürzung auch im üblichen Sinne verwendet (z. B. *v*, *l*, *r* usw.)

- G Gewicht des Rohguts.
 L Gewicht der Luft im Anfangszustand.
 c_p Spezifische Wärme der Luft (trocken).
 r Verdampfungswärme.
 σ Verdampfungszahl.
 λ Wärmeleitzahl.
 b Kohleberührter Bogen im Röhrentrockner.
 s Die Kohle begrenzende Sehne im Röhrentrockner.
-

Einleitung.

Während man sonst in allen Zweigen der Gewinnung und Verarbeitung von Braunkohle aufs sorgsamste nach einer Minderung der Gestehungskosten strebt, ist im allgemeinen den Kosten, die durch die Trocknung der Rohkohle entstehen, wenig Beachtung geschenkt worden. Und doch sind diese Kosten recht beträchtlich; das an sich bedeutende Wärmeerfordernis wird durch mannigfache Verluste erhöht. Von den reichlich 10000 Doppelwaggon Rohkohle, die an einem Tag zur Herstellung von Briketts dienen, sind etwa 3000 in der Hauptsache dazu erforderlich, das überschüssige Wasser zu verdampfen. Eine Verringerung dieses Bedarfs durch Minderung der Verluste ist also von ganz außerordentlicher Bedeutung, selbst wenn die Verringerung prozentual nicht allzu erheblich ist.

Da eine derartige Rechnung auch für den einzelnen Betrieb sehr naheliegend ist, so erscheint es zunächst auffallend, daß man in der überwiegenden Mehrzahl aller Betriebe sich keine Rechenschaft über die Höhe der durch die Trocknung erwachsenden Kosten gibt, und daß in der Literatur Angaben über vorgenommene Untersuchungen dieser Art fast nicht vorhanden sind, Anhaltspunkte über das überhaupt Erreichbare vollständig fehlen. Der Grund für diesen zweifellosen Mangel liegt zum Teil in der Schwierigkeit der rechnerischen Durchführung, hauptsächlich aber in dem Fehlen eines Meßinstrumentes, an dessen Angaben man mit einigem Vertrauen auf ihre Richtigkeit herantreten könnte.

Infolge dieser Unklarheiten trat die Frage der größtmöglichen Wirtschaftlichkeit überhaupt in den Hintergrund; wie das Bestreben der Verwaltungen einseitig auf die Erzielung einer möglichst hohen Leistung gerichtet ist, so wirkte auch die Mehrzahl der eingeführten Neuerungen, Erhöhung der Dampfspannung und Dampfgeschwindigkeit, Wendeleisten, Vergrößerung der Abmessungen, in derselben Richtung.

Ist nun auch im Hinblick auf die hohen Anlagekosten nebst deren Amortisation und Verzinsung diesem Standpunkt unbedingt beizutreten, so erscheint es gleichwohl nicht richtig, die Frage nach der Wirtschaftlichkeit des Trockenprozesses vollständig unbeachtet

zu lassen. Bei der Einstellung der Apparate, Regelung von Füllung und Umdrehungszahl, ist es nötig, sich von der Arbeitsweise Rechenschaft zu geben, wie auch dauernde Betriebskontrolle unnötigen Verlusten vorbeugen wird.

Und ebenso empfiehlt es sich bei der Konstruktion von Trockenapparaten, die den Vorgang beeinflussenden Faktoren derart zu verbinden, daß ein möglichst glücklicher Kompromiß zwischen Leistung und Wirtschaftlichkeit, Anlage- und Betriebskosten geschaffen wird. Zu dem Zwecke ist es nötig, sich über den Einfluß aller Faktoren klar zu werden, was freilich wieder die Mittel zur Untersuchung voraussetzt. Erst dann, wenn dies der Fall ist, wozu in dieser Arbeit ein Anfang gemacht werden soll, ist es möglich, den Standpunkt der reinen Empirie zu verlassen, der im Trocknungsfach üblich ist und schon zu manchen herben Enttäuschungen geführt hat.

Durch die vorstehenden Erwägungen ist auch das Programm der Arbeit gegeben.

Es werden zunächst Hilfsmittel zur Untersuchung von Trockenanlagen behandelt werden, denen ein Bericht über ausgeführte Untersuchungen in bereits bestehenden Brikettfabriken folgt. Der zweite Teil der Abhandlung betrifft die den Trockenprozeß beeinflussenden Faktoren, wie sie sich nach allgemeinen Erwägungen und Versuchen des Verfassers ergeben, denen eine Besprechung praktisch wichtiger Fragen nach den gewonnenen Anschauungen folgen wird.

I. Die Untersuchung von Trockenanlagen.

Das theoretisch erforderliche Mindestquantum Wärme, um Wasser aus dem flüssigen oder gebundenen Zustand in Dampf überzuführen, ist die Verdampfungswärme bei der Temperatur, die das Rohgut besitzt. Es sind demnach pro 1 kg Wasser bei 0° 594,7, bei 15° 586,8 Kal. aufzuwenden. Diese Werte unterscheiden sich nicht allzuviel voneinander, und, da die Eintrittstemperaturen von Wetter und Jahreszeit abhängen, empfiehlt es sich, hierfür einen Mittelwert einzuführen, zu dem die Wärmemenge von 590 Kal. als 8°, dem Jahresmittel der Temperaturen in Mitteleuropa, entsprechend geeignet erscheint.

Die Untersuchung von Trockenanlagen hat sich demnach darauf zu erstrecken, wie weit der tatsächlich vorhandene Zustand sich dem idealen nähert, sie hat festzustellen, wieviel Wärme in Wirklichkeit verbraucht wurde, und erfolgt am zweckmäßigsten durch Aufstellen einer Wärmebilanz. In allgemeiner Form ergibt sich eine solche durch Messung der für den Zweck der Trocknung erzeugten Wärmemenge und Vergleich mit dem Quantum verdampften Wassers. Sie umfaßt dann aber alle Vorgänge und Verluste, die sich von der Erzeugungsstelle der Wärme ab abspielen und einschleichen, sie ist nicht geeignet, Anhaltspunkte darüber zu geben, wo die Hauptquelle der Verluste zu suchen und Verbesserung möglich ist.

In den meisten Fällen ist es möglich, die Wärmebilanz enger zu fassen und auf den Trockenvorgang selbst zu beschränken. Es ist dann die Wärmemenge festzustellen, die das Rohgut bei seinem Eintritt in den Apparat besitzt, und die Wärmemenge, welche beim Austritt von Trockengut und Dampf aus dem Trockenapparat mitgeführt wird. Erfolgt die Trocknung bei gleichzeitiger Anwesenheit von Luft, so ist auch diese in die Untersuchung einzubeziehen. Die Bestimmung des Wärmeinhalts von Rohgut und Trockengut ist theoretisch einfach und erfolgt durch Messung der Temperatur und Menge, woraus sich bei bekannter spezifischer Wärme die Wärmemenge ergibt. In Wirklichkeit ist diese Bestimmung schwieriger, weil die spezifische Wärme mit dem Wassergehalt veränderlich ist.

Wo, wie bei der Trocknung von Braunkohle, die in Rohgut und Trockengut vorhandenen Wärmemengen gegenüber den sonstigen gering sind, genügt eine überschlägige Annahme. Eine solche ist hier allgemein üblich und beruht darauf, daß man der vollkommen trockenen Kohle die spezifische Wärme von Koks zuschreibt und den Wassergehalt mit der spezifischen Wärme des Wassers = 1 in Rechnung setzt. Ist dann w der Wassergehalt in 1 kg Kohle, so ist die spezifische Wärme:

$$0,20 (1 - w) + w = 0,20 + 0,80 w.$$

Auch im folgenden soll diese Berechnungsart beibehalten werden.

Schwieriger gestaltet sich die Ermittlung des Wärmewertes der eintretenden bereits wasserführenden Luft und der austretenden Luft samt dem in ihr enthaltenen Wasserdampf.

A) Untersuchung des Dampf-Luftgemisches.

Die Ermittlung der in dem Dampf-Luftgemisch enthaltenen Wärmemengen setzt voraus, daß bekannt ist, wieviel Luft und wieviel Dampf in dem Gemisch enthalten sind, und zwar wird man, da die Volumina mit den Temperaturen (bei gleichbleibendem Druck) stets wechseln, die Ermittlung des Gewichts der Komponenten vorziehen. Da alle Zustände des Dampfes von seiner Spannung abhängig sind, diese aber eine komplizierte transzendente Funktion ist, so ist eine direkte rechnerische Ermittlung in Form einer Gleichung nicht möglich, vielmehr ist es nötig, sich tabellarischer Zusammenstellungen zu bedienen, deren einfachste Form die Spannungstabelle ist. Werden weiterschreitend immer mehr Daten zur Berechnung zusammengezogen, so entstehen die eigentlichen Tabellen zur Trocknung. Dahin gehört z. B. die Zusammenstellung in Landolt-Börnstein, Physikalisch-Chemische Tabellen, Berlin 1905, die sich auf Angaben über den Wassergehalt in 1 kg Luft bei Sättigung und 760 mm Barometerstand beschränkt. Für manche Fälle sehr bequem ist die Tabelle im Taschenbuch „Hütte“, 20. Aufl., S. 322 u. 323. Mit ihrer Hilfe lassen sich genaue Resultate nach Berücksichtigung aller Umstände leicht erhalten, sie beschränkt sich aber auf die Ermittlung der Gewichtsteile von Luft und Dampf im Volumen bzw. der Volumeneinheit. Dagegen ist es schwieriger, den Veränderungen zu folgen, die gleiche Quanten Luft mit fortschreitender Wasserdampfaufnahme durchmachen, auch erfordert die Berechnung der Wärmemengen besondere Rechnung.

Noch mehr wollen die Rechnung vereinfachen die Werke, die ausschließlich der Trocknung und dem Entwerfen von Trockenanlagen gewidmet sind. Es kommen hier in Frage insbesondere: Hausbrand, Das Trocknen mit Luft und Dampf, Berlin 1908, und Mertens, Die Eigenschaften und physikalischen Gesetze der Luft und des Dampfes, Leipzig 1904.

In beiden ist eine Anzahl Tabellen enthalten, die für bestimmte angenommene Zustände von Dampf-Luftgemischen insbesondere die darin enthaltenen Gewichtsmengen von Luft und Wasserdampf enthalten. Beide sind zunächst mehr als für die Untersuchung für das Entwerfen von Trockenanlagen eingerichtet, wo man eben darauf angewiesen ist, gewisse Fälle zu supponieren. Die Methode, die Mertens anwendet, ist recht schwülstig und leicht geeignet, denjenigen zu verwirren, der, ohne fundamental in den verfolgten Gedankengang eingedrungen zu sein, eine Berechnung und noch vielmehr eine Untersuchung auf Grund der Tabellen versuchen wird. Hierzu trägt außer der außerordentlich großen Zahl von Abkürzungen der Umstand bei, daß die gesamte Rechnung sich auf den Volumina aufbaut und deshalb bei dem Übergang zu einer anderen Temperatur erst eine Umrechnung erfolgen muß. Infolgedessen ist auch schon, um lediglich die Mengen zu berechnen, ein Näherungsverfahren nötig, während zur Ermittlung der erforderlichen Wärme erst wieder besondere Rechnungen erforderlich sind. Hausbrand hat den bequemen Weg beschritten, die Übersichten auf die Gewichtsmengen, und zwar auf das gleichbleibende Gewicht der Luft, zu dem das wechselnde Dampfgewicht hinzutritt, zu beziehen. Er erreicht hierdurch zugleich die Möglichkeit zu diagrammatischer Aufzeichnung, die den Vorteil leichter Interpolation bei von den berechneten abweichenden Verhältnissen bietet. Es ist zu verwundern, daß Hausbrand auf diesem zweckmäßigen Weg nicht folgerichtig weitergegangen ist und als Gegenstück zur diagrammatischen auch die tabellarische Zusammenstellung ausgebaut hat. Er verliert sich in eine große Zahl einzelner Tabellen, die unter Umständen vielleicht Nutzen gewähren werden, während in der Mehrzahl der Fälle die Tabellenwerte (z. B. II, III, V, VI, VII, XIII, XIV, XV, XVI) insbesondere bei Berücksichtigung von Trockenguterwärmung, Wärmeverlust und Volumen nicht genügen. Ähnliches gilt auch, mit Ausnahme der Diagramme, wenn man die Tabellen zur Untersuchung von bestehenden Anlagen benutzen will. Immerhin ist der Spielraum zwischen den berechneten Werten auch bei den Diagrammen sehr groß. Hat man z. B. bei 90° Lufttemperatur

40° Sättigung festgestellt, so ist eine Interpolation kaum mehr möglich, übersteigen die Temperaturen 90°, so ist der Bereich der Diagramme überschritten. Und gerade diese Temperaturen kommen speziell bei Braunkohlentrocknung meist vor. Wenn letzteres nun auch ein leicht zu beseitigender Mangel ist, so bleibt die Schwierigkeit der Interpolation bestehen; man könnte daran denken, sie durch eine weitere Kurvenschar zu erleichtern, doch ist dies eine etwas umständliche Arbeit, wozu dann die weitere Schwierigkeit tritt, daß alle diese Angaben sich nur auf den Normaldruck beziehen.

Eine Vereinfachung liegt nun dann vor, wenn man sich von allen Tabellen frei macht, die sich auf die verschiedenen Sättigungsgrade beziehen, und alles auf den Zustand zurückführt, den das Dampf-Luftgemisch dann einnehmen würde, wenn es auf den Taupunkt abgekühlt bzw. gesättigt wird. Für diesen Punkt müssen nun alle charakteristischen Daten gegeben sein. Man stellt sich weiter vor, daß ein solches Gemisch bei gleichem Druck — dem Normaldruck von 760 mm auf 0° reduzierter Quecksilbersäule — erwärmt wird, und gelangt so wieder zum Ausgangspunkt zurück. Wie dies Zurück- und Vorwärtsgreifen zu geschehen hat, wird später zu erörtern sein.

Zunächst seien die charakteristischen Daten gegeben, die für jeden Zustand eines Dampf-Luftgemisches maßgebend sind. Es sind dies:

1. Die Spannung des Wasserdampfes S . Die Spannung des gesättigten Wasserdampfes ist insbesondere von Regnault untersucht und für fortlaufende Temperaturen berechnet worden. Diese Zahlen sind enthalten in Wüllner, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. II, S. 747. Sie weichen von 90° an etwas von den Zahlen ab, die in Mollier, Neue Tabellen und Diagramme für Wasserdampf, Berlin 1906, angegeben sind, während im übrigen die Berechnungsweise nach der im letzteren Werke angegebenen erfolgte. Diese Abweichungen sind um so bedeutungsloser, als Sättigungen bei 90° und darüber schwerlich auftreten werden. Wenn die Sättigungen über 90° mit aufgenommen sind, so geschah das, um mit 100° einen natürlich gegebenen Abschluß der Tabellen zu erzielen.

2. Das Dampfgewicht γ ist der reziproke Wert des spezifischen Volumens v , $\gamma = \frac{1}{v}$, wobei

$$v = 47 \frac{T}{P} - 3 + 0,001 = 47 \frac{T}{10333} \cdot \frac{760}{S} - 3 + 0,001$$

ist (Mollier, a. a. O., S. 8).

3. Die Dampfwärme i'' , der Wärmehalt von 1 kg Dampf im gesättigten Zustand, berechnet sich nach Mollier, ebenda, unter Benutzung der dort angegebenen Hilfsgrößen zu:

$$i'' = 594,735 + 0,477 t - \mathfrak{S}p,$$

wobei $p = \frac{1,033}{760} S$ zu setzen ist.

4. Zur Ermittlung der Gewichtsmengen von Luft und Dampf, die in einem gesättigten Dampf-Luftgemisch enthalten sind, dient folgende Betrachtung:

Die Spannung des gesättigten Wasserdampfes S ist durch die Temperatur bestimmt. Bei der durch den Barometerstand B gegebenen Gesamtspannung des Gemisches entfällt nach dem Daltonschen Gesetz auf die Luft der Rest der Spannung $= B - S$, wenn B gleichfalls in Millimetern Quecksilbersäule von 0^0 gegeben ist. Hieraus läßt sich das Gewicht der Luft bestimmen, das in 1 cbm enthalten ist. Nach „Hütte“, 20. Aufl., Bd. I, S. 319, ist das Gewicht eines Normalkubikmeters Luft $= 1,188$ kg, das Gewicht von 1 cbm Luft bei der Temperatur t und der Spannung $(B - S)$ in Millimetern Quecksilbersäule von 0^0 ist demnach nach dem Gay-Lussac-Mariotteschen Gesetz:

$$l = 1,188 \cdot \frac{273 + 15}{273 + t} \cdot \frac{B - S}{735,5} = 0,4643 \frac{B - S}{273 + t} \text{ kg.}$$

Das Gewicht des Dampfes im Kubikmeter ist durch die Dampfdichte γ gegeben.

Auf 1 kg Luft kommen demnach $\frac{\gamma}{l}$ kg bzw. $d = 1000 \cdot \frac{\gamma}{l}$ g Wasserdampf:

$$d = \frac{1000 \cdot \gamma (273 + t)}{0,4643 \cdot (B - S)} \text{ Gramm.}$$

Die Wasserführung auf 1 kg Luft ist demnach umgekehrt proportional der Differenz zwischen Barometerstand und Spannung des Wasserdampfes. Es ist deshalb eine Umrechnung leicht möglich, wenn d für einen gewissen Barometerstand, z. B. 760 mm, gegeben ist. Es muß sein:

$$\frac{d}{d_1} = \frac{B_1 - S}{B - S}.$$

5. Die Wärmemenge, die das Gemisch von 1 kg Luft und d g Wasser bei der Sättigungstemperatur t_s besitzt, ermittelt sich zu

$$J = 0,2375 t + \frac{d}{1000} i'' \text{ W.E.,}$$

wobei 0,2375 (W.E.) die spezifische Wärme der Luft bei gleichbleibendem Druck (c_p) ist.

6. Wird das Gemisch über den Taupunkt erwärmt, so kann man bei den in Frage kommenden niedrigen Drucken und Temperaturen die spezifische Wärme des Wasserdampfes c_p als konstant = 0,477 annehmen, und es ist deshalb die Wärmemenge, die nötig ist, das Gemisch um 1° zu erwärmen, bestimmt zu:

$$c_r = 0,2375 + \frac{d}{1000} \cdot 0,477 \text{ W.E.},$$

und der Wärmehalt des Gemisches bei einer beliebigen Temperatur ϑ oberhalb des Taupunktes:

$$Q = J + c_r (\vartheta - t_s) \text{ W.E.}$$

7. In vielen Fällen ist die Kenntnis des Volumens wichtig, das ein bestimmtes Luft-Dampfgemisch einnimmt. Es wäre an sich richtiger, diese Rechnung mit Hilfe des scheinbaren Molekulargewichts durchzuführen, doch ist es für den Zweck eines Tabellenwerkes bequemer, sich der etwas ungenaueren Methode der Gaskonstante zu bedienen. Wie man sich probeweise überzeugen kann, sind in den in Frage kommenden Fällen die Differenzen ganz minimal und verschwinden gegenüber den Ungenauigkeiten, die in den grundlegenden Messungen selbst enthalten sind.

Nimmt man also an, daß das Gemisch dem Gasgesetz folgt, so ist $PV = GR_m T$, wobei die Bezeichnungsweise als bekannt vorausgesetzt werden kann.

Um das Volumen von 1 kg trockener Luft nebst d g in ihr enthaltenen Wassers zu bestimmen, hätte man also anzusetzen, wenn man mit v das Volumen des Gemisches bezeichnet:

$$\frac{10333}{760} B \cdot v = (1 + 0,001 d) \frac{29,26 + 0,047 d}{1 + 0,001 d} \cdot T$$

$$v = \frac{29,26 + 0,047 d}{10333} \cdot \frac{760}{B} \cdot T$$

bezw. bei 760 mm Barometerstand:

$$v = \frac{29,26 + 0,047 d}{10333} \cdot T,$$

$$\frac{v}{T} = \frac{29,26 + 0,047 d}{10333}.$$

Durch Multiplikation dieses Wertes $\frac{v}{T}$ mit einer beliebigen absoluten Temperatur erhält man also das Volumen bei dieser Temperatur und 760 mm Barometerstand:

$$v = \frac{v}{T} \cdot T.$$

Für einen anderen Barometerstand B ist als Volumen von 1 kg trockener Luft nebst dem darin enthaltenen Wasserdampf:

$$v' = \frac{v}{T} \cdot T \cdot \frac{760}{B}.$$

Bevor die auf vorstehendem aufgebauten Tabellen selbst besprochen werden, mögen noch einige Beziehungen folgen, die sich aus der näherungsweisen Berechnung von γ ergeben.

8. Setzt man näherungsweise:

$$\gamma = \frac{10333 S}{47 \cdot 760 \cdot T},$$

$$\frac{\gamma}{S} = \frac{0,289}{T},$$

so ergibt sich daraus, daß bei gleicher Temperatur und gleichem Barometerstand der zweite Ausdruck konstant ist. Ist deshalb in 1 cbm Dampf nicht γ , sondern γ' kg Wasserdampf enthalten, so muß sein $\frac{\gamma'}{S'} = \frac{\gamma}{S}$; $\frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{S}{S'}$, d. h. die Spannungen verhalten sich wie die Dampfdichten. (Vergl. auch „Hütte“, 20. Aufl., S. 322.)

9. Setzt man den gleichen Näherungswert für γ in die Formel (4) ein, so ergibt sich:

$$0,4643 d (B - S) = 1000 \cdot 0,289 \cdot \frac{S}{T} \cdot T,$$

$$S = \frac{0,4643 d B}{289 + 0,4643 d}.$$

Hieraus kann man S berechnen, wenn die Zusammensetzung des Luft-Dampfgemisches bekannt ist; man erkennt zugleich, daß die Spannung angenähert unabhängig von der Temperatur ist, und daß bei Kompression und Expansion des Gemisches sich die Spannungen wie die Drücke ändern, wobei selbstverständlich die Einschränkung zu machen ist, daß die Spannung nicht höher wird, als die bei der betreffenden Temperatur mögliche Maximalspannung.

10. Die Tabellen (Anhang I) enthalten, zugeordnet zu den Taupunkttemperaturen t_s , die Spannungen des gesättigten Wasserdampfes, die Dampfdichte und den Wärmehalt von 1 kg Dampf bei der Sättigungstemperatur. Die beiden letzteren Werte werden regelmäßig nicht gebraucht und stellen nur die Grundlagen der weiteren Rechnung dar.

Es folgen dann die Werte von d , J , c_r und $\frac{v}{T}$, alles für einen Barometerstand von 760 mm Quecksilbersäule von 0°. Die Tempe-

raturen springen unterhalb 0° um je 5° , während sie oberhalb des Nullpunktes fortlaufen. Es sind zudem die Differenzen angegeben, um zwischen den ganzen Graden bequemer interpolieren zu können. Es erscheint in diesen engen Grenzen angängig, die Interpolation geradlinig vorzunehmen, wenngleich bei höheren Temperaturen auch hierbei schon beträchtliche Abweichungen entstehen. Man bedient sich in solchen Fällen besser des graphischen Verfahrens und schätzt die Zwischenpunkte entsprechend der Progression der bekannten Werte ein. Hierauf ist später zurückzukommen. Für die Messungen, die lediglich die Wärmeökonomie zum Gegenstand haben, ist aber lineare Interpolation vollauf genügend.

11. Es soll nun die Benutzung der Tabellen für die Untersuchung von Trockenanlagen dargetan werden. Die grundlegende Messung selbst kann erfolgen:

- a) Durch Bestimmung der relativen Feuchtigkeit.
- b) Durch Bestimmung des Taupunktes.
- c) Durch Bestimmung der Gewichtsanteile von Luft und Wasserdampf.

a) Es sei z. B. mittels Haarhygrometers festgestellt, daß die Luft mit 15° und 40% gesättigt in den Trockenapparat eintrete und mit 85° und 35% Sättigung austrete. Es seien stündlich 25 kg Wasser aufgetrocknet worden. Der Barometerstand sei $B = 760$ mm.

Die Spannung der Luft ist beim Eintritt $12,7 \cdot 0,4 = 5,1$ mm Hg, beim Austritt $433 \cdot 0,35 = 151,5$ mm Hg. Da nach (9) die Spannung von der Temperatur unabhängig ist, entspricht die Spannung beim Eintritt einem Taupunkt von 2° , beim Austritt von $60,4^{\circ}$.

Hieraus ergibt sich beim Austritt $d = 156,1$,

beim Eintritt $d = 4,4$,

1 kg Luft hat also aufgenommen $151,7$ g Wasser,

und es waren demnach erforderlich $\frac{25}{0,1517} \sim 164,6$ kg Luft.

Der Wärmeinhalt in 1 kg

Luft beim Austritt ist $111,6 + 0,3119 (85 - 60,4) = 119,3$ W.E.,
der Wärmeinhalt in 1 kg

Luft beim Eintritt ist $2,9 + 0,2396 (15 - 2) = 6,0$ „

Es sind also pro 1 kg Luft zugeführt 113,3 W.E.,

und auf 169,6 kg Luft $169,6 \cdot 113,3 = 19250$ W.E.

und pro 1 kg verdampftes Wasser = 770 „

abgesehen natürlich von der Trockenguterwärmung und äußeren Verlusten.

Das Volumen beim Eintritt berechnet sich zu:

$$\frac{2,852}{1000} (273 + 15) 169,6 = 139 \text{ cbm.}$$

Das Volumen beim Austritt berechnet sich zu:

$$\frac{3,542}{1000} (273 + 85) 169,6 = 215 \text{ cbm.}$$

Der Barometerstand sei nicht 760 mm, sondern 743 mm Quecksilbersäule.

Nach (4) ist dann:

$$d' = \frac{d(B - S)}{B' - S},$$

also beim Eintritt:

$$d' = \frac{4,4 (760 - 5,1)}{743 - 5,1} = 4,5 \text{ g,}$$

beim Austritt:

$$d' = \frac{156,1 (760 - 151,5)}{743 - 151,5} = 160,8 \text{ g.}$$

Der Taupunkt ist derselbe geblieben, aber die Mengenverhältnisse haben sich geändert. Da die folgenden Werte aber nur auf den Mengenverhältnissen aufgebaut sind, so kann man interpolieren, als ob der Taupunkt geändert wäre, dessen Verschiebung allerdings bei den in Betracht kommenden Barometerschwankungen immer nur Zehntelgrade beträgt. Es würde entsprechen $d = 160,8$ bei 760 mm Barometerstand einem Taupunkt von $60,9^\circ$. Es ist der

Wärmeinhalt beim

$$\text{Austritt} \dots 114,6 + 0,3141 (85 - 60,4) = 122,1 \text{ W.E.,}$$

$$\text{Wärmeinhalt beim Eintritt wie zuvor} \dots = 6 \text{ „}$$

also pro 1 kg Luft zugeführt 116 W.E.

1 kg Luft hat aufgenommen $160,8 - 4,5 = 156,3 \text{ g Wasser}$, es waren demnach für 25 kg Wasser erforderlich 160 kg Luft, und es wurden verbraucht im ganzen $160 \cdot 116 = 18570 \text{ W.E.}$, pro 1 kg verdampftes Wasser 743 W.E., ein günstigerer Wert.

Das Volumen beim Eintritt würde sein nach (7):

$$\frac{2,852}{1000} (273 + 15) \frac{760}{743} \cdot 160 = 134,3 \text{ cbm,}$$

beim Austritt:

$$\frac{3,563}{1000} (273 + 85) \frac{760}{743} \cdot 160 = 208 \text{ cbm.}$$

Zum Vergleich sei das letzte Beispiel nach „Hütte“, S. 323, und mit den dort angegebenen Abkürzungen berechnet.

Es ist:

$$\gamma = \gamma'' \frac{h}{735,5} - \Delta q,$$

$$= \gamma'' \frac{743}{735,5} - \Delta q.$$

wenn der Druck in Millimetern Quecksilbersäule von 0^0 angegeben ist.

Für die eintretende Luft ergibt sich:

$$\gamma = 1,188 \frac{743}{735,5} - 0,4 \cdot 0,008 = 1,197 \text{ kg.}$$

Es enthält 1 cbm Dampfluft demnach $0,4 \cdot 12,8 \text{ g} = 0,051 \text{ kg}$ Wasserdampf und $1,197 - 0,051 = 1,192 \text{ kg}$ Luft, 1 kg Luft enthält 4,6 g Wasser.

Nach Berechnung der entsprechenden Werte γ'' und Δ , die in der Tabelle Seite 323 nicht mehr enthalten sind, gilt für den Austritt:

$$\gamma'' = 0,958 \cdot \frac{743}{735,5} - \frac{0,176 \cdot 0,35 \cdot 433}{358} = 0,893.$$

In 1 cbm sind $0,35 \cdot 0,354 = 0,124 \text{ kg}$ Wasser enthalten und $0,769 \text{ kg}$ Luft, in 1 kg Luft demnach 161,5 g Wasser, so daß 1 kg Luft aufnehmen kann $161,5 - 4,6 = 156,9$ Wasser. Die Übereinstimmung mit der früheren Rechnung ist also genau genug, wenn man die Ungenauigkeit der Rechnung berücksichtigt, und daß die Rechnungsoperationen mit Rechenstab durchgeführt wurden. Es ermittelt sich das Volumen z. B. beim Austritt folgendermaßen. Es waren erforderlich $\frac{25}{9,1569} = 159,2 \text{ kg}$ Luft und $\frac{159,2}{0,769} = 207 \text{ cbm.}$

b) Ist der Taupunkt bestimmt worden, so ist bei 760 mm Barometerstand die direkte Ablesung aus den Tabellen möglich, während bei anderem Barometerstand dasselbe Verfahren anzuwenden ist, wie oben bei 743 mm Barometerstand gezeigt wurde.

c) Sind die Gewichtsanteile von Luft und Wasser bestimmt worden, so ist auch bei abweichendem Barometerstand die Ablesung aus den Tabellen für die Bestimmung der Wärmewerte ausreichend; die Berechnung des Volumens erfolgt nach (7) durch Multiplikation des aus der Tabelle erhaltenen Wertes v mit dem Ausdruck $\frac{760}{B}$. Will man den Taupunkt bzw. die Spannung des Wasserdampfes kennen, so ist die aus der Tabelle ersichtliche, den Gewichtsmengen entsprechende, Zahl im gleichen Sinne mit den Barometerständen zu erhöhen oder zu erniedrigen.

12. Die Tabellen sind ferner sehr bequem bei der Berechnung von Trockenanlagen. Es sei ein Vergleich mit Beispiel 7 in Hausbrand (a. a. O.), S. 27, gezogen.

„Es sollen bei dem Barometerstande von 760 mm 100 kg Wasser aufgetrocknet werden durch Luft, die im Maximum auf 100° erhitzt werden darf, wenn die Außentemperatur 0° ist; dabei wird angenommen, daß die Außenluft ganz, die aus dem Apparat gehende Luft nur $\frac{3}{4}$ mit Wasserdampf gesättigt sei. Die Temperatur des Trockengutes sei 15° .“

1 kg gesättigte Luft von 0° hat bei 100° $0,24 \cdot 100 = 24$ W.E. aufgenommen; sie führte bereits 2,2 W.E., so daß sie dann 26,2 W.E. enthält. Man vergleicht nun in Spalte 7 den Wärmeinhalt von 1 kg gesättigter Luft etwas unterhalb der Zahl 26,2. Es kämen hierfür augenscheinlich die Werte um 30° herum in Frage, z. B. für 30° 23,6. Soll die Luft zu $\frac{3}{4}$ gesättigt sein, so muß die Spannung des Wasserdampfes bei der Austrittstemperatur um $\frac{1}{3}$ höher sein als die bei 30° , also etwa 35° . Es kämen demnach zu den 23,6 W.E. nach (c), $0,25 \cdot 5 = 1,25$ W.E. hinzu, so daß im ganzen 24,85 W.E. verbraucht wären, also die Wärme nicht ausgenutzt würde. Bei 31° stellen sich die Wertverhältnisse folgendermaßen: $J = 24,9$, Endtemperatur 36° , also Wärmeinhalt am Ende $24,9 + 0,25 \cdot 5 = 26,2$ W.E. Bei 100 kg Wasser würden demnach 96200 W.E. verbraucht. Hausbrand setzt die Rechnung nicht fort unter Berücksichtigung der Erwärmung des Trockengutes und der Verluste. Möge beispielsweise der Wärmeverbrauch zur Erwärmung des Trockengutes pro 1° 1000 W.E. betragen, dann sind also zur Erwärmung auf $(t - 15)^{\circ}$ erforderlich 1000 $(t - 15)$ W.E. Es sei ferner approximativ ein Verlust von 10 % durch Strahlung usw. angenommen. Der Verlust läßt sich dadurch ausgleichen, daß man nicht 24, sondern 21,6 W.E. Zuwachs rechnet. Man wird nun probieren:

Es sei z. B. 32° Austrittstemperatur; dann ist die Luft bei etwa 27° gesättigt und enthält pro 1 kg Luft 22,6 g Wasser, hat also $22,6 - 3,8 = 18,8$ g Wasser aufgenommen, so daß insgesamt $\frac{100}{0,0188} = 5320$ kg Luft erforderlich wären, die die Träger von etwa 115000 W.E. sind. Der Wärmeinhalt am Anfang war $5320 \cdot 2,2 = 11700$ W.E.; die Luft enthält beim Austritt $5320 (20 + 5 \cdot 0,25) = 112800$ W.E., so daß 101100 W.E. verbraucht wurden; hierzu kommen $(27 - 15) 1000 = 12000$ W.E. für Trockenguterwärmung, so daß im ganzen $101100 + 12000 = \sim 113000$ W.E. erforderlich sind. Das ist für den vorliegenden Zweck genau genug. Die

wirkliche Temperatur könnte man berechnen, wenn Δt die Temperaturdifferenz ist:

$$\Delta t (5320 \cdot 0,25 + 1000) = 2000, \Delta t = 0,8^\circ,$$

so daß die Endtemperatur $32,8^\circ$ würde, die relative Sättigung $71,6\%$.

Es sind durchweg nur einfache Rechnungen und Erwägungen notwendig, die auch dem nicht schwer fallen werden, der weniger oft Gelegenheit hat, sich mit der Materie zu befassen.

Dagegen soll durch das Eingehen auf die Berechnungsweise Hausbrands durchaus nicht die Ansicht vertreten werden, daß das Anstellen solcher Rechnungen überhaupt schon den Erfolg einer Trockenanlage verbürge, denn es ist damit noch nicht gesagt, daß auch wirklich die errechnete Sättigung erzielt werden wird. Wie sich später ergeben wird, bleibt der Sättigungsgrad der Luft beim Durchlaufen des Trockenapparates nicht konstant und wird durch mancherlei Faktoren beeinflusst, deren Zusammenwirken einen wesentlich anderen Sättigungsgrad bedingen kann als den beabsichtigten. Es ist demnach zwecklos, eine allzu große Mühe auf die Rechnung zu verwenden, wogegen bei Untersuchung von Anlagen Genauigkeit natürlich anzustreben ist.

13. Die Tabellen sind besonders bequem bei Berechnung über die Rückgewinnung von Wärme. Sie ergeben nicht nur den Wärmeinhalt von gesättigter Luft, sondern auch die spezifische Wärme:

$$c_p = \frac{c_r}{1 + \frac{d}{1000}}$$

und das Volumen zur Ermittlung der Geschwindigkeit und des Wärmeübertragungskoeffizienten und gestatten, den Vorgang ziemlich genau zu verfolgen. An späterer Stelle wird hierauf zurückzukommen sein.

B) Die Messung des Feuchtigkeitsgehaltes der Luft.

Es ist nicht schwer, den Feuchtigkeitsgehalt der Luft zu bestimmen, wie sie sich in der Natur bzw. Atmosphäre vorfindet. Man kann sich nach Belieben eines Instrumentes bedienen, das den Taupunkt direkt anzeigt, wie das Danielsche Hygrometer, oder indirekt auf ihn schließen läßt, wie das Aspirationshygrometer, oder man kann die relative Feuchtigkeit, das Verhältnis der wirklichen zur möglichen Wasserdampfspannung mit Hilfe eines der verschiedenen Apparate bestimmen, die auf der Veränderung von Eigenschaften

organischer Körper mit wechselndem Feuchtigkeitsgehalt beruhen, und von denen das Haarhygrometer das bekannteste ist.

Anders ist es, wenn die feuchte Luft eine derartige Temperatur besitzt, daß der Aufenthalt von Menschen in ihr unmöglich wird. Dann kann die Beobachtung nicht mehr unmittelbar erfolgen, und es macht sich die Zwischenschaltung eines Fensters nötig, an dem kondensierende Luft und meist auch Staub sich ansetzen und dadurch eine Messung illusorisch machen können. Es ist deshalb die Beobachtung der Trübung der Goldzone am Danielschen Hygrometer kaum möglich, und ebenso steht es mit den Temperaturbeobachtungen des Aspirationshygrometers, bei dem noch die Schwierigkeit der Eichung für die hohen Temperaturen hinzutritt. Aus diesen Gründen ist wohl allein das Haarhygrometer in Verwendung genommen bzw. in Betracht gezogen worden, denn wie bereits erwähnt, kann von einer größeren Verbreitung nicht die Rede sein. Dies ist wohl auch zum Teil dem Mißtrauen zuzuschreiben, mit dem man den solchergestalt gewonnenen Resultaten entgegensieht, besonders, wo es sich um höhere Temperaturen handelt. Ist doch noch gar nicht festgestellt, welcher Grund für die Verkürzung und Verlängerung des Haares mit der Veränderung der Feuchtigkeit der Luft vorliegt und welchen Gesetzen sie folgt. Da der Wassergehalt des Haares selbst vermutlich die Ursache ist, dieser aber in einem relativ trockenen Raume mit der Zeit abnehmen muß, so wird das Instrument nach einiger Zeit eine zu niedrige Feuchtigkeit anzeigen, wofür auch die Notwendigkeit öfterer Justierung spricht. Für einen kontinuierlichen Betrieb ist das Haarhygrometer also kaum geeignet; es ist nicht bekannt, wie sich die selbstregistrierenden Apparate bewährt haben. Weiteren Zweifel erweckt die reichliche Staubabsonderung in den Trockenräumen, zumal den Brikettfabriken, die zweifellos auf die Dauer nicht ohne Einfluß sein kann, die Veränderung behindert und die Lagerreibung vermehrt. Natürlich ist auch hier durch den Staub und den sich an den zur Beobachtung anzubringenden Scheiben kondensierenden Wasserdampf die Ablesung sehr erschwert. Bei Schulzapparaten in Brikettfabriken kommt weiter störend hinzu, daß durch die Wasserabscheiderohre der Raum zu sehr verengt ist, als daß der Apparat im Trockenraum selbst untergebracht werden kann, so daß also ein selbstregistrierender Apparat verwendet werden muß, wenn man nicht einen besonderen Raum anlegen will, durch den die Luft hindurchgesaugt wird; denn auch in den Staubkammern wird sich die Messung nur schwer bewerkstelligen lassen, und es liegt die Möglichkeit vor, daß hier bereits Kondensationen statt-

gefunden haben. Eine weitere Schwierigkeit wird dadurch geschaffen, daß zur Ermittlung des Resultates zweierlei Beobachtungen erforderlich sind, die sich beide ganz genau auf denselben Zustand beziehen müssen, die Bestimmung der relativen Feuchtigkeit und der Temperatur. Es hat sich gezeigt, daß Sättigung und Temperatur stark schwanken, auch in kurzen Zeiträumen. Der Fehler, den man macht, wenn das Instrument eine falsche relative Feuchtigkeit anzeigt, ist ja klar. Das Resultat wird aber schon dadurch falsch, daß man die Temperaturen unrichtig bzw. an falscher Stelle abliest. Hat man z. B. am Hygrometer 40 % Sättigung abgelesen, am Thermometer statt 95° aber 96°, so beträgt, wie man aus den Tabellen leicht ermitteln kann, der Fehler in der Wasserführung pro 1 kg trockene Luft 6,5 %, im Wärmeverbrauch pro 1 kg verdampftes Wasser 1,5 %, also Fehlerwerte, die selbst in der Praxis schon mitsprechen. Diese Fehlermöglichkeit liegt aber besonders bei den selbstregistrierenden Instrumenten vor. Will man die Messung über längere Zeit fortsetzen, um zufällige Schwankungen tunlichst auszuschalten, so muß das Diagramm unter Einführung der Temperaturen umgearbeitet werden. Hohe Sättigung ist nicht allein das Kennzeichen guter Trocknung, es muß stets die Temperaturmessung ergänzend hinzutreten. Da es erforderlich ist, die Instrumente in der Nähe der Außenwand anzubringen, so werden sie meist infolge der Abkühlung zu hohe Werte anzeigen; man muß deshalb auch die Temperatur unmittelbar am Meßinstrument ablesen, nicht an beliebiger Stelle des Trockenraumes. So wird die Gewinnung von Durchschnittswerten recht schwierig.

Bei einem Versuch, in das Wesen der Trockner genauer einzudringen, schien es nun vor allem erforderlich, die Grundlagen der erforderlichen Messungen möglichst genau zu gestalten, um nicht durch falsche Messungen zu falschen Schlüssen geführt zu werden, oder richtige Schlüsse aus mangelndem Vertrauen zu der Zuverlässigkeit der Grundlagen zu unterlassen.

Es war also erforderlich, einen Apparat derart zu konstruieren, daß er in allen seinen Teilen rechnerisch nachgeprüft werden kann, und der nächstliegende Weg war die Übertragung maßanalytischer Methoden auch auf dies Gebiet, die Bestimmung der Gewichtsmengen Luft und Dampf, die in dem Gemisch enthalten sind, durch volumetrische Messungen allein oder in Verbindung mit Gewichtsmessungen. Bedingungen für einen derartigen Apparat sind dann noch Unempfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen der Luft und die Möglichkeit, die Messungen kontinuierlich oder wenigstens über größere Zeiträume vorzunehmen.

Wünschenswert erscheint ferner, daß der Apparat leicht zu handhaben ist und möglichst wenig Teile enthält, die einer besonderen Wartung bedürfen.

Will man eine Trennung von Luft und Wasserdampf vornehmen, so bieten sich zwei Möglichkeiten: die Absorption des Wasserdampfes durch eine hygroskopische Substanz und die Abscheidung des Wassers durch Abkühlung.

Der erste Weg ist kostspielig und deshalb schwer gangbar, weil die aus Trockenlagen stammende Luft meist eine Menge Staub enthält, der schwierig auszuschcheiden ist, und eine Gewichtsmessung des durch die hygroskopische Substanz (Chlorkalzium, Ätzkali, Ätzkalk, Schwefelsäure usw.) aufgenommenen Wassers illusorisch machen würde.

Es wurde deshalb vorgezogen, dem Dampf-Luftgemisch das Wasser oder wenigstens einen Teil desselben durch Abkühlung zu entziehen, die Menge dieses Wassers festzustellen, und das diesem Vorgang unterworfenen Luftgewicht nebst dem in ihm noch verbliebenen Wasserdampfgewicht volumetrisch zu bestimmen.

Kühlt man ein Dampf-Luftgemisch bis unter den Taupunkt ab, so scheidet sich ein Teil des Wasserdampfes als Wasser ab, das verbleibende Gemisch aber geht in den Sättigungszustand über, oder wenigstens kann man annehmen, daß dies annähernd der Fall ist und die relative Feuchtigkeit mindestens 90⁰ beträgt. Diese letztere Annahme findet sich bei Hausbrand (a. a. O., S. 49). Es ist nicht bekannt, welche Gründe Hausbrand zu dieser Ansicht bewegen; man wird aber ohne weiteres zugeben können, daß im Grenzzustand eine haarscharfe Trennung nicht möglich ist, andererseits erscheint aber die Annahme einer nur 90prozentigen Sättigung deshalb unwahrscheinlich, weil die freie atmosphärische Luft selbst häufig eine Sättigung über 90⁰/₁₀ aufweist, die doch auch nur auf dem Wege der Abkühlung eines ursprünglich trockneren Gemenges entstanden sein kann. Für den praktischen Fall ist diese Frage allerdings ziemlich bedeutungslos, wie sich später ergeben wird. In dem entstandenen gesättigten Dampf-Luftgemisch sind nun die Gewichtsanteile der beiden Komponenten bekannt, wenn die Temperatur und der Druck, dem das Gemisch ausgesetzt ist, im allgemeinen der atmosphärische Druck, bekannt ist. Mißt man das Volumen, so kann man hieraus die absoluten Gewichtsmengen ermitteln, und ebenso hat man es in der Hand, das Volumen so einzurichten, daß man bei bestimmtem Druck und Temperatur ein gewünschtes Gewicht von Luft oder Dampf in dem Gemisch

vor sich hat. Die Begründung ergibt sich unmittelbar aus dem unter I A Gesagten.

Bei der Temperatur t_s ist die Spannung des gesättigten Wasserdampfes durch den Wert S gegeben, die Spannung der gleichfalls anwesenden Luft als Teildruck ($B - S$) usw.

Die Rechnung wird sich natürlich am einfachsten gestalten, wenn man bei jeder Messung dasselbe Luftgewicht zugrunde legt, und es ist deshalb erforderlich, das Volumen mit wechselnden Drücken und Temperaturen zu verändern.

Sieht man zunächst von einer der beiden Variablen ab, am besten vom Druck, der ja, wenigstens als atmosphärischer, nicht zu sehr schwankt, so ist es leicht, das Volumen den Verschiedenheiten der anderen Variablen, also der Temperatur, anzupassen. Man wird dann einen Normaldruck festsetzen, dem die Abmessungen des Apparates zunächst angepaßt werden, und wird abweichenden Barometerständen durch eine — wie sich später zeigen wird, sehr einfache — Korrektur Rechnung tragen.

Diesen Erwägungen folgend, ist das nachstehend beschriebene Kondensationshygrometer konstruiert worden (Fig. 1).

Die zu untersuchende Luft wird aus dem Trockenraum zunächst in einen Kühler abgesaugt, in dem sie durch Wasser gekühlte kupferne Röhren durchströmt. Es sind deren in dem zu Versuchszwecken erbauten Apparat 70 Stück von je 30 cm Länge, 1 cm Durchmesser und 0,5 mm Wandstärke mit zusammen etwa 0,7 qm Kühlfläche. Die Luft tritt unterhalb der Rohre in einen nach unten zu verjüngten Kasten aus Zinkblech ein und geht, in einzelne Ströme geteilt, aufwärts durch 30 Rohre hindurch. Am Kopfende wendet sich die Luft wieder nach unten und bestreicht hierbei 20 Röhren, um dann nochmals durch 20 Röhren nach oben zu steigen, von wo sie dann abgezogen wird. Die Rohre sind in Reihen zu je 10 Stück angeordnet mit etwa 1 cm Zwischenraum, während zwischen den Reihen selbst mehr Platz vorhanden ist, um eine gründliche Reinigung zu ermöglichen. Oberhalb der Röhren sind Verschlußdeckel aufgeschraubt, und zwar einer über den ersten fünf Reihen, ein anderer über den letzten zwei Reihen von Rohren; der letztere enthält zugleich den Anschlußstutzen für die Luftabführung und ein Thermometer. Nach Abheben dieser Deckel können die Röhren von oben her gereinigt werden. Um ein direktes Übertreten der frisch eintretenden Luft nach den letzten Rohrreihen zu verhindern und die gewünschte Luftzirkulation sicherzustellen, muß eine Trennwand in dem Kasten unterhalb der Rohre vorhanden sein, die aber den

Übertritt des kondensierten Wassers nicht verhindern darf. Die Wand ist deshalb nicht ganz bis auf den schräg verlaufenden Boden des Kastens herabgeführt und taucht in einen Wasserverschluß ein, der vom Kastenboden und einem senkrecht und parallel der Trennungs-

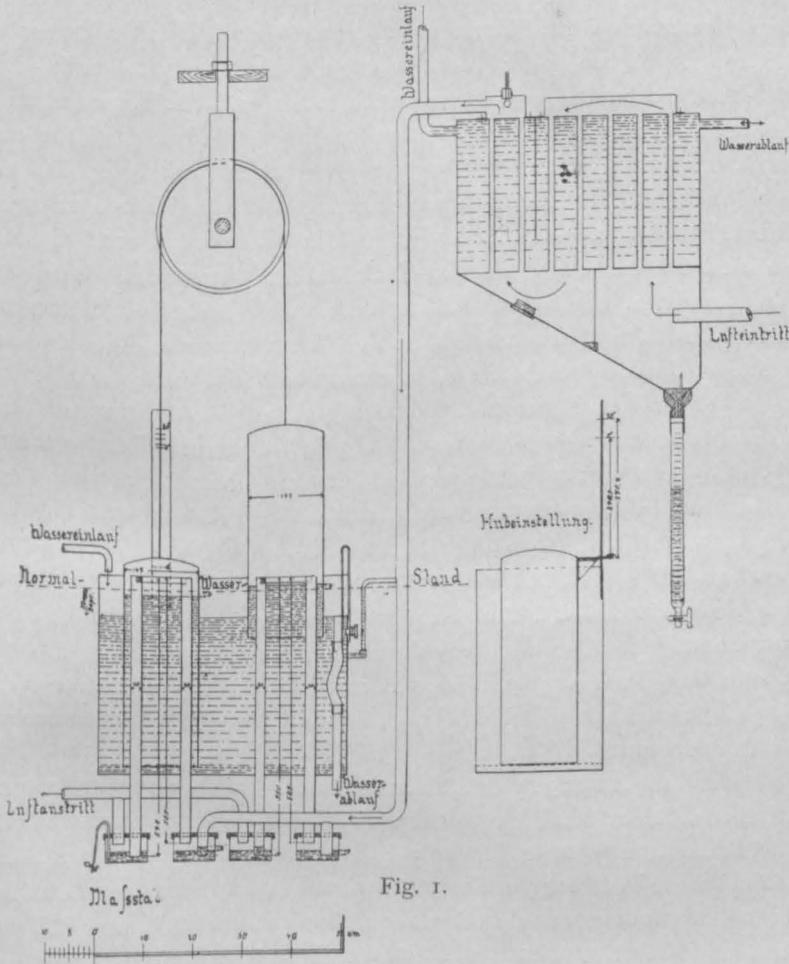


Fig. 1.

wand stehenden Blech gebildet wird. Das kondensierende Wasser füllt den gebildeten Winkel aus und läuft über die Oberkante des freien Winkelschenkels ab. Sofort beim Eintritt in den Kühler kommt die Luft unter die herabfallenden Tropfen aus den ersten 30 Rohren und wird infolgedessen schnell in den gesättigten Zustand versetzt. Mit dem entstehenden Nebel werden die Staubeilchen niedergeschlagen, so daß bereits am oberen Ende der ersten Reihen nur noch wenig Staub in der Luft vorhanden ist und die ganz über-

wiegende Menge der Verunreinigungen auf dem Boden unterhalb dieser Reihen abgelagert wird.

Das Kondensat fließt an den schrägen Bodenflächen abwärts und sammelt sich am tiefsten Punkt des Kastens, um von da in eine Bürette oder ein sonstiges Meßgefäß abzufließen, in dem seine Menge bestimmt wird. Zuvor wird es aber durch Watte oder dergl. filtriert, um es von den Verunreinigungen befreit austreten zu lassen.

Aus später zu erwähnenden Gründen soll das Kondensat in möglichst regelmäßig fallenden Tropfen in das Meßgefäß einfließen. Durch das mit Wasser vollgesogene Filter könnte aber diese Regelmäßigkeit gestört werden, indem immer erst ein gewisser Überdruck erforderlich wäre, um ein Abfließen des Wassers zu ermöglichen. Um deshalb den Ausgleich des Luftdruckes zwischen Bürette und Kühlapparat zu erleichtern, ist zur Verbindung beider ein Röhrchen durch das Filter hindurchgeführt. Es kann nun das Wasser ungehindert durch eine Durchbohrung unterhalb des Filters abtropfen.

Die den Kühler verlassende gesättigte Dampf-Luft ist angenähert auf die Temperatur des Kühlwassers abgekühlt und ihre Temperatur läßt sich beim Verlassen des Kühlers an einem Thermometer beobachten. Die Bewegung der Luft durch den Kühler wird hervorgerufen durch zwei sich abwechselnd auf- und abbewegende Meßglocken, die in Wasser eintauchen und mit Hilfe von entsprechenden Verschlüssen beim Aufgange Luft ansaugen, beim Niedergange Luft ausstoßen. Die Glocken sind aus Messing gefertigt, sie sind in ständiger Berührung mit Wasser und mit Wasser benetzt, so daß hier mit Sicherheit die Abkühlung der Luft auf die Temperatur des Kühlwassers erfolgt.

Um das Ansaugen und Ausstoßen der Luft zu regeln, waren zwischen Kühler und Meßglocken Absperrorgane einzuschalten. Da Hähne und Ventile für solche Zwecke sehr minutiös ausfallen und peinliche Wartung verlangen, wurden Wasserverschlüsse gewählt, deren Anordnung aus der Zeichnung ersichtlich ist. Ihre Füllung kann nach Abschrauben des gläsernen Unterteiles erfolgen, die genaue Justierung auch während des Ganges selbst aber durch mit Quetschhähnen verschlossene Röhrchen geschehen, die, als Heber wirkend, den Wasserstand leicht verändern lassen. Durch diese Wasserabschlüsse und den Wasserspiegel im Tauchgefäß wird die angesaugte Luft nach unten abgeschlossen, ihr Volumen bestimmt sich also im wesentlichen durch die Eintauchtiefe der Meßglocken in das Tauchgefäß. Diese muß also, will man das Volumen verändern, verstellbar sein. Beide Glocken sind zu diesem Zwecke

an den Enden einer Kette befestigt, die über ein Rad läuft. Mittels einer Schraube kann die Höhenlage dieses Rades verstellt werden, so daß beim Höherschrauben auch eine Erhöhung des Hubes der Meßgefäße eintritt und umgekehrt. Um die Hubhöhe selbst genau festzulegen, ist die eine Meßglocke mit einem Schnabel versehen, mit dem sie an einer Messingstange so geführt wird, daß man die Höhe des Hubes an einer dort befindlichen Skala ablesen kann.

Die Berechnung des Hygrometers gestaltete sich folgendermaßen: Es war beabsichtigt, den Apparat nicht nur zur Ausführung einzelner Messungen zu verwenden, sondern ihn so auszugestalten, daß mit einem Blick wenigstens ein oberflächliches Urteil über das Funktionieren der Trockenapparate möglich sein solle. Als ein derartiges Hilfsmittel schien die Tropfenzählung geeignet. Wie bekannt, ist der Mensch für Intervalle regelmäßig wiederkehrender Erscheinungen außerordentlich empfindlich; kleine Abweichungen (vergl. Uhren) werden schnell und stark von den Sinnen aufgenommen. Nun muß bei gleichbleibendem Arbeiten der Trockenapparate, gleichbleibender Kühlwassertemperatur und Schnelligkeit der Luftentnahme in gleichen Zeiten auch das gleiche Wasserquantum kondensiert werden; hält man den Gang des Hygrometers also konstant, so muß sich eine Änderung der Sättigung im Trockenraume durch ein größeres oder geringeres Quantum Kondensat anzeigen; läßt man das Kondensat durch ein schwaches Röhrchen abtropfen, so folgen die Tropfen bei gleichbleibender Größe derselben in verschiedenen Zeitintervallen. Es erschien nun zweckmäßig, die Menge der durch das Hygrometer angesaugten Luft so zu bestimmen, daß in der Sekunde ein Tropfen von $\frac{1}{12}$ bis $\frac{1}{13}$ g Gewicht bei günstigem Arbeiten des Trockenapparates fallen soll. Und zwar wurde, da das Hygrometer in der Hauptsache für Brikettfabriken gedacht war, als ein wünschenswerter Zustand die Sättigung bei 60⁰, bzw. 0,75 relative Feuchtigkeit bei 67⁰ angenommen. Es war damals noch nicht bekannt, daß die Arbeitsweise des Schultrockners eine ganz wesentlich günstigere ist. Es enthält dann 1 kg Luft 152,5 g Wasser, so daß bei 15⁰ Kühlwassertemperatur rund 142 g Wasser abtropfen müssen. Soll nun in der Sekunde ein Tropfen von $\frac{1}{12}$ g fallen, so sind rund 0,5 g Luft in der Sekunde durch den Apparat zu führen, die dann 0,071 g Wasser ergeben würden, einen Tropfen bei einer Tropfenzahl von 14 auf 1 g Wasser. Bei den Messungen zeigte sich, wie hier vorweggenommen werden soll, eine Tropfenzahl von 16 auf 1 g Wasser und ferner eine Sättigung von etwa 74⁰, so daß also die Mengen um das Doppelte zu groß waren;

man konnte sich aber natürlich einfach dadurch helfen, daß man das Hygrometer langsamer betrieb. Aus den Tabellen ergibt sich, daß ein Anteil von 0,5 g trockener Luft in einem gesättigten Luft-Dampfgemisch einem Volumen des Gemisches entspricht von 0,389 l bei 0°, 0,406 l bei 10°, 0,425 l bei 20°, alles bei 760 mm Barometerstand. Um eine bequeme Rechnung zu erhalten, sind die Meßglocken so dimensioniert, daß bei jedem Hub das Zehnfache des sekundlich verlangten Luftquantums angesaugt wird, also pro Hub 5 g, pro Doppelhub 10 g trockene Luft im gesättigten Dampf-Luftgemisch. Unter der ursprünglichen Annahme sollten deshalb in der Minute drei Doppelhübe gemacht werden. Mit 100 Doppelhüben würde 1 kg (trockene) Luft den Apparat passiert haben. Als Durchmesser der Meßglocken, die aus gezogenem Messingrohr von 1 mm Wandstärke hergestellt sind, war 15 cm in Aussicht genommen. Zur Feststellung der Hubhöhe, bis zu der eine Meßglocke aufwärts bewegt werden muß, um bei einer Auf- und Abbewegung 10 g Luft in einem gesättigten Dampf-Luftgemisch von bekannter Temperatur abzumessen, ist es erforderlich, aus Druck und Volumen nach dem Ansaugen und nach dem Drücken die Differenz zu bestimmen. Infolge der Wasserverschlüsse ist der auf die eingeschlossene Luft ausgeübte Druck ein verschiedener. Als Verschlüßhöhe ist 1 cm Wassersäule angewandt, die also beim Saugen um ebensoviel gehoben werden muß, um der Luft den Eintritt zu gestatten, beim Drücken aber um ebensoviel unter den normalen Wasserspiegel im Verschlüßglase gesenkt wird.

Ist also in der Atmosphäre ein Barometerstand von 760 mm vorhanden, der einem Druck von 10333 kg pro 1 qm entspricht, so steht die Luft in der Meßglocke nach dem Saugen unter einem Druck von 10323 kg, nach dem Drücken, also in Endstellung unten, unter einem solchen von 10343 kg. Diese Druckunterschiede müssen bei der Berechnung der Volumina berücksichtigt werden. Dies erfordert aber zugleich eine Berücksichtigung der schädlichen Räume, die in Verbindung mit der Eichung des Apparates geschehen soll.

Da die Änderung der Volumina durch Veränderung der Eintauchtiefe der Meßglocken und insbesondere durch Verschiebung von deren Aufhängepunkt geschehen soll, muß der Wasserspiegel im Tauchgefäß fixiert sein, er muß eine bestimmte Lage zu der einen, stets bleibenden Endstellung — der unteren — der Meßgefäße haben. Es geschieht dies, indem ein verschiebbares Abflußrohr im Tauchgefäß auf eine außerhalb angebrachten Marke eingestellt und das Tauchgefäß langsam gefüllt wird. Wenn das Wasser ab-

zulaufen beginnt, hat sich an den Meßglocken ein deutlich erkennbarer Streifen ausgeprägt, der den Wasserstand bezeichnet.

Es wurde nun an diesem Streifen ein feines Loch durch die Wand der Meßglocke gebohrt und diese umgekehrt auf eine Wage gesetzt und nach dem Trocknen austariert. Nachdem mittels Wachs an das Loch ein Ablaufröhrchen angeklebt war, wurde die Glocke mit Wasser gefüllt, das nach einigem Stehen eine Temperatur von 12°C angenommen hatte und beim Ansteigen bis an das Loch auszufließen begann, bis das überschießende Wasser abgelaufen war. Nun wurde das Wachsröhrchen entfernt und die Gewichtsvermehrung gemessen. Es ergab sich, daß der linke Zylinder um 948 g, der rechte um 926,5 g zugenommen hatte, und es wurde das Volumen des Raumes oberhalb des Wasserspiegels demnach zu 948 bzw.

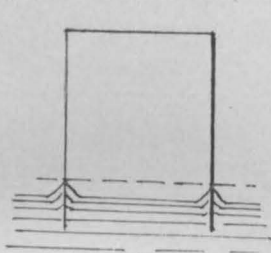


Fig. 2.

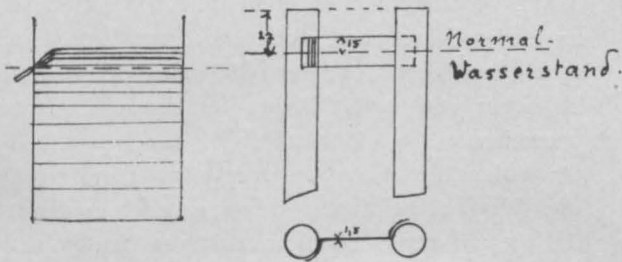


Fig. 3.

926,5 cm ermittelt, unter der Annahme eines spezifischen Gewichtes des Wassers $= 1$. Durch die beschriebene Meßmethode sollte die Kapillarkwirkung des Wassers möglichst ausgeschaltet werden. Während das Wasser längs der Außenwand des Meßzylinders höher steigt, als der eigentliche Wasserspiegel selbst, und infolgedessen die Bezeichnung des zu bohrenden Loches um ebensoviel zu hoch ausfällt, tritt beim Umdrehen der Glocke gerade das Umgekehrte ein; der Wasserspiegel innerhalb des Gefäßes stellt sich infolge der Oberflächenspannung höher, als das Loch selbst sich befindet. Beide Erscheinungen wirken entgegengesetzt und gleichen sich bis zu einem gewissen Grade aus, so daß der entstehende Fehler nur gering sein kann (Fig. 2).

Die linke Meßglocke hat folgenden Querschnitt: am unteren Ende als geringsten inneren Durchmesser 146,6 mm, als größten 147,1 mm; am oberen Ende gemessen 149 mm äußeren Durchmesser, bei 0,95 mm Wandstärke also 147,1 mm inneren Durchmesser. Der rechte Meßzylinder hatte unten 148,9 mm inneren Durchmesser, oben 149 mm Durchmesser bei 1 mm Wandstärke. Es konnte demnach

der Durchmesser jeder der beiden Meßglocken mit 147 mm, der Querschnitt also mit 169,72 qcm angenommen werden.

In den Luftraum hinein ragen die beiden Zuführungsrohre von 22 mm äußerem Durchmesser (Fig. 3). Der Querschnitt eines Rohres ist 3,8 qcm, die Höhe 27 mm über Normalwasserstand; hierzu kommt noch ein Verbindungsstreifen von 78 mm Länge und 1,5 mm Stärke, der aber nur bis 15 mm über den Normalwasserstand reicht. Es sind demnach von den ermittelten Räumen oberhalb dieses abzuziehen bei jeder Glocke:

$$2 \cdot 3,8 \cdot 2,7 + 7,8 \cdot 0,15 \cdot 1,5 = 21,5 \text{ ccm.}$$

Der Querschnitt dieser hervorragenden Teile ist:

$$2 \cdot 3,8 + 7,8 \cdot 0,15 = 8,8 \text{ qcm.}$$

Infolge der Wasserverschlüsse ist der Normalwasserstand in der Endstellungen nicht vorhanden, vielmehr steht der Spiegel am Ende des Saughubes 1 cm über, am Ende des Niederganges 1 cm unter dem Normalstand, so daß sich der zusätzliche Raum im ersten Falle um $169,72 - 8,8$ ccm verringert, im zweiten um ebenso viel vermehrt.

Der lichte Durchmesser sämtlicher Rohrleitungen ist 20 mm, die Wandstärke 1 mm, der innere Querschnitt also 3,14 qcm, der äußere 3,8 qcm. Die ganze Länge der beiden Druckrohre beträgt im linken Zylinder 548 mm, im rechten 550 mm. Am Ende des Niederganges der Meßglocken sind sie ganz wasserfrei, haben also demnach einen Inhalt von $54,8 \cdot 3,14 = 172,1$ ccm bzw. $55,0 \cdot 3,14 = 172,7$ ccm. Beim Saugen steigt das Wasser bis 1 cm über den Normalwasserstand, so daß sich das Volumen jeder Röhre um $3,14 \cdot 2 = 6,3$ ccm verringert; also links 165,8 ccm, rechts 166,4 ccm beträgt.

Der Raum in den Druckgefäßen selbst steht nicht in Verbindung mit den Meßglocken.

Stets ganz mit Luft erfüllt sind die Saugrohre mit 2 cm lichtem Durchmesser und je 525 mm Länge, also je 164,9 ccm Inhalt. Dasselbe gilt von dem Luftraum in den Gefäßen der Saugverschlüsse. Der Wasserstand in ihnen reicht bis 1 cm über das untere Ende der Lufteintrittsröhre und ist dort markiert. Der Wasserspiegel ist dann auf die Gefäßwand übertragen und dort ebenfalls angerissen worden. Es wurde nun mittels Pipette der Inhalt der Gefäße bis zu dieser Marke austariert, der beim linken Verschluß 75,3, beim rechten 63,3 ccm betrug. Dann wurden die Gefäße mit der Pipette bis oben hin voll gefüllt und links 155,3, rechts 149,4 ccm ermittelt, so daß der Luftraum im linken Gefäß 80 ccm, im rechten 86,1 ccm beträgt.

Der Luftraum wird noch verkleinert durch das Saugrohr mit 22 mm äußerem Durchmesser, 3,8 qcm Querschnitt, und das Füllrohr mit 0,7 cm äußerem Durchmesser und 0,38 qcm Querschnitt, zusammen 4,3 qcm Querschnittfläche. Der Abstand der Marke vom Deckel beträgt links 1,8 cm, rechts 2,0 cm, so daß eine Verringerung des Luftraumes links um 7,74 ccm, rechts um 8,6 ccm eintritt. Abzuziehen ist ferner das 0,5 cm in den Raum hineinragende, nach der Meßglocke führende Rohr mit 2,2 cm äußerem Durchmesser, also je 1,90 ccm. Der Luftraum des linken Saugverschlusses beträgt sonach $80 - 7,74 - 1,90 = 70,36$ ccm, der des rechten Saugverschlusses $86,1 - 8,6 - 1,9 = 75,6$ ccm. Beim Saugen wird im Zuführungsrohr der Wasserspiegel um 1 cm gesenkt, so daß bei 2 cm lichtigem Durchmesser des Rohres 3,14 ccm in den Saugraum zurücktreten und diesen verengen, während umgekehrt beim Drücken 3,14 ccm aus dem Saugraum herausgedrängt werden.

Hebt man die Meßglocke um 1 cm in die Höhe, so wird ein Zuwachs von 169,72 ccm geschaffen.

Es berechnen sich nun die an den einzelnen Vorgängen teilnehmenden Volumina wie folgt:

1. Nach Beendigung des Hubes, also nach Heben der Meßglocke um 1 cm.

Hubvolumen 169,72 l ccm.

| | Links: | Rechts: |
|-------------------------------------|----------|----------|
| Räume unter der Glocke | + 948 | + 926,5 |
| In die Glocke hineinragende Teile . | — 21,5 | — 21,5 |
| Hebung des Wasserspiegels | — 160,9 | — 160,9 |
| Druckrohre | + 165,8 | + 166,4 |
| Saugrohre | + 164,9 | + 164,9 |
| Saugverschluß . . . | + 70,3 | + 75,6 |
| Hebung des Wasserspiegels | — 3,14 | — 3,14 |
| | + 1349,0 | + 1333,4 |
| | — 185,5 | — 185,5 |

| Links: | Rechts: |
|------------------------------|------------------------------|
| 169,72 l + 1349,0 ccm, | 169,72 l + 1333,4 ccm, |
| — 185,5 „ | — 185,5 „ |
| <hr/> 169,72 l + 1163,5 ccm. | <hr/> 169,72 l + 1147,9 ccm. |

2. Nach erfolgtem Niedergang:

| | Links: | Rechts: |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Raum unter der Glocke | + 948,0 | + 926,5 |
| In die Glocke hineinragende Teile . . | — 21,5 | — 21,5 |
| Senkung des Wasserspiegels | + 160,9 | + 160,9 |
| Druckrohre | + 172,1 | + 172,7 |
| Saugrohre | + 164,9 | + 164,9 |
| Saugverschluß | + 70,3 | + 75,6 |
| Senkung des Wasserspiegels | + 3,1 | + 3,1 |
| | + 1519,3 — 21,5 | + 1503,7 — 21,5 |
| | = 1497,8 ccm. | = 1482,2 ccm. |

Da beide Meßglocken denselben Hub besitzen sollen, kann man sich beide vereinigt denken und erhält also die Volumina:

$$2 \text{ l. } 169,72 + 1163,5 + 1147,9 = 2 \text{ l. } 169,72 + 2311,4 \text{ ccm}$$

nach erfolgtem Ansaugen, und

$$1497,8 + 1482,2 = 2980,0 \text{ ccm}$$

nach erfolgtem Niedergang der Meßglocken, für einen Doppelhub geltend.

Zur weiteren Berechnung sollen die Formeln im Taschenbuch „Hütte“, 20. Aufl., I, S. 323, benutzt werden, da sie leichter einen Überblick über vorkommende Fehler und Änderungen erlauben, als die sonst bequemerem Angaben der Tabelle (Anhang I).

Es war beabsichtigt, in 100 Doppelhüben 1 kg Luft im Dampf-Luftgemisch durch den Apparat zu saugen. In 1 cbm gesättigter Luft sind $\gamma'' \frac{h'}{737,5} - A - \gamma'$ kg trockene Luft enthalten, oder bei 760 mm Quecksilbersäule (0⁰) Barometerstand $\gamma'' \frac{10333}{10000} - A - \gamma'$ kg, bei 10 mm Widerstand in den Verschlüssen besitzt also 1 cbm Dampf-Luft nach erfolgtem Ansaugen $\gamma'' \frac{10323}{10000} - A - \gamma'$ kg trockene Luft, nach dem Endhub $\gamma'' \frac{10343}{10000} - A - \gamma'$ kg trockene Luft, oder auch, wenn alles in Liter und Gramm ausgedrückt wird, enthält 1 Liter Dampf-Luft $\gamma'' \frac{10333}{10000} - A - \gamma'$ g Luft.

Es muß also sein:

$$100 \left[\left(\frac{21169,72}{1000} + 2,3114 \right) \left(\gamma'' \frac{10323}{10000} - \mathcal{A} - \gamma' \right) - 2,98 \left(\gamma'' \frac{10343}{10000} - \mathcal{A} - \gamma' \right) \right] = 1000.$$

Hieraus ermittelt sich nun leicht der erforderliche Hub, und zwar ergab sich mit Weglassung der Zwischentemperaturen für

| | | | | | | | | | | |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---------------|
| 0° | . | . | . | . | . | . | . | . | . | 248,9 mm Hub, |
| 5° | . | . | . | . | . | . | . | . | . | 253,9 " " |
| 10° | . | . | . | . | . | . | . | . | . | 258,9 " " |
| 15° | . | . | . | . | . | . | . | . | . | 264,3 " " |
| 20° | . | . | . | . | . | . | . | . | . | 270,3 " " |

die Differenz pro 1° betrug etwa 1 bis 1,2 mm.

Die untere Hubbegrenzung ist durch das Aufsetzen der Meßglocken gegeben und läßt sich auf der Skala, die mit dem Tauchgefäß bereits fest verbunden war, leicht anreißen. Von diesem Strich aus wurden mit Teilmaschine die übrigen Skalenteile für jeden Grad abgetragen. Das Einstellen geschieht nun einfach so, daß die eine Meßglocke auf tiefster Stellung gehalten und die Befestigungsschraube so lange gedreht wird, bis der an der anderen Glocke befindliche Schnabel auf dem der beobachteten Kühlwassertemperatur entsprechenden Teilstrich einspielt.

Voraussetzung für alle diese Berechnungen ist, daß der Wasserspiegel als untere Begrenzung des gemessenen Raumes konstant erhalten wird. Es schadet zwar nichts, wenn während des Hubes selbst Veränderungen und Schwankungen stattfinden, wenn nur während der Hubpause der Stand des Wasserspiegels den Voraussetzungen entspricht, nämlich nach Beendigung des Saughubes um den Widerstand des Wasserverschlusses über der Eichlage, nach Beendigung des Druckhubes ebenso viel unter derselben. Dies wird nun nicht der Fall sein, wenn, wie gewöhnlich, im Trockenraum ein anderer, meist niedrigerer Druck herrscht als der atmosphärische.

Während des Saughubes wird sich dieser Unterdruck zu dem durch den Widerstand des Wasserverschlusses verursachten addieren, beim Ausstoßen der Luft dagegen nicht in Wirksamkeit treten. Führt man die Luft nach dem Verlassen des Apparates aber wieder in den Trockenraum zurück, so wirkt der Unterdruck desselben auch während der Druckperiode; die Wirkung ist dann dieselbe, als wenn der Wasserspiegel in den Meßglocken um die Höhe des Unterdruckes zu hoch eingestellt wäre. Senkt man den

Wasserstand in dem Tauchgefäß um denselben Betrag, so wird der mittlere Wasserstand in den Glocken dem normalen Eichzustand entsprechen. Diese Einstellung geschieht in höchst einfacher Weise, indem der Wasserablauf aus dem Tauchbehälter in der Höhe verstellt wird. Am Tauchbehälter selbst ist ein Wasserstandsglas angebracht, das den Normalwasserspiegel an einer Marke erkennen läßt. Mittels eines Schlauches wird das obere Ende des Wasserstandsglases mit dem Trockenraum in Verbindung gebracht, so daß auch in ihm der Wasserstand um das Maß des Unterdruckes steigt. Senkt man ihn nun mittels des verstellbaren Abflusses wieder auf die Eichmarke herab, so folgt dieser Verstellung auch der mittlere Wasserstand in den Meßglocken.

Ist der Unterdruck im Trockenraum nur ein geringer, so genügt diese Maßnahme allein, man kann sogar von der Rückführung der Luft in den Trockenraum absehen, ohne einen größeren Fehler zu begehen. Anders dagegen liegt die Sache, wenn der Unterdruck beträchtlich ist; der Fall liegt dann genau so, als wenn überhaupt ein abweichender Barometerstand vorliegt, dessen Behandlung also hiermit verbunden werden kann.

Das Gewicht von 1 cbm gesättigter Dampf-Luft bestimmte sich zu $\gamma = \gamma'' \frac{h}{735.5} - A$, und das Gewicht der darin enthaltenen reinen Luft $l = \gamma'' \frac{h}{735.5} - A - \gamma'$; oder, wenn man mit γ''' die für 760 mm Quecksilbersäule ermittelten Werte setzt und h_0 den beobachteten Barometerstand bedeutet:

$$l = \gamma''' \frac{h_0}{760} - A - \gamma;$$

bezw.

$$l = \gamma''' \frac{h_0}{760} - \frac{760}{760} A - \frac{760}{760} \gamma.$$

Die Werte für A und γ sind im Gebiete der Messung, also von 0^0 bis 20^0 ziemlich klein, sie haben ihre Höchstwerte bei 20^0 mit $A = 0,008$ und $\gamma = 0,017$, zusammen $A + \gamma = 0,025$, gegenüber einem Wert von γ''' bzw. l von ungefähr 1.

Ersetzt man nun den Wert $(A + \gamma) \frac{760}{760}$ durch den Wert $(A + \gamma) \frac{h_0}{760}$, so wird man zwar einen Fehler begehen, der aber um so kleiner wird, je mehr sich h_0 an 760 nähert. Für 730 mm

Quecksilbersäule und 20° Kühlwassertemperatur würde der Fehler $(A + \gamma) \left(1 - \frac{730}{760}\right) = 0,001$ betragen, also rund 1 0/100 des Wertes für γ''' bzw. l .

Man kann deshalb die Formel für l auch schreiben:

$$l = \frac{h_0}{760} (\gamma''' - A - \gamma),$$

bzw. für einen anderen Barometerstand:

$$l_1 = \frac{h_0'}{760} (\gamma''' - A - \gamma).$$

Es ist demnach $\frac{l}{l_1} = \frac{h_0}{h_0'}$, d. h. in dem Intervall von 0° bis 20° gilt für ein Dampf-Luftgemisch der Satz, daß bei gleichem Volumen die in ihm enthaltenen Mengen trockener Luft sich verhalten wie die Drücke bzw. Barometerstände, wenn dieselben nicht ganz abnorm von dem Werte 760 mm abweichen.

Man hat deshalb z. B. in 100 Doppelhüben nicht $l = 1$ kg trockene Luft in dem Dampf-Luftgemisch durch den Apparat gesaugt, sondern z. B. bei 740 mm Barometerstand nur $l = \frac{740}{760}$ kg, bei 780 mm Barometerstand $l = \frac{780}{760}$ kg. Da sich aber alle Angaben auf 1 kg trockene Luft beziehen, so ist eine Korrektur der gemessenen bzw. aus einer Tabelle entnommenen Wassermenge d' nötig, so daß man erhält: $d = d' \cdot \frac{760}{h_0}$.

Mit großer Genauigkeit läßt sich die Rechnung auch so ausführen, daß man in den Grenzen von 730 bis 780 mm Quecksilbersäule für jedes Millimeter Abweichung von dem Normalstand 760 mm 1,3 0/100 zu- oder abschlägt, je nachdem der Barometerstand unter oder über 760 mm war; oder, wenn d' der erst ermittelte Wert des in dem angesaugten Quantum vorhandenen Wassers bzw. Dampfes ist, so gilt:

$$d = d' [1 + 0,0013 (760 - B)].$$

Die Ermittlung des unkorrigierten Wertes d' geschieht in einfacher Weise dadurch, daß das kondensierte Wasser während einer bestimmten Hubzahl gemessen wird; da in 100 Doppelhüben 1 kg trockene Luft durch den Apparat gesaugt wird, ist die gemessene Kondensatmenge auf 100 Doppelhübe umzurechnen und ergibt dann das aus 1 kg Luft kondensierte Wasser. Aus der Temperatur des gesättigten Dampf-Luftgemisches beim Verlassen des Kühlers läßt

sich weiter nach den Tabellen der Wassergehalt pro 1 kg trockene Luft ansehen, der nicht kondensiert wurde. Beide addiert geben den gesamten Wassergehalt, der eventuell noch der Barometerkorrektur zu unterwerfen ist.

Sieht man von letzterer ab, so ist es möglich, die Ablesung des Taupunktes unmittelbar vorzunehmen. Es ist dann lediglich eine Skala zu entwerfen, die — beispielsweise für 25 Doppelhübe — die Werte von d nach Temperaturgraden und in dem Maßstabe der Bürettenteilung aufweist. Stellt man die Skala nun neben der Bürette so ein, daß auf dem Nullpunkt der Bürette die beim Verlassen des Kühlers beobachtete Temperatur der Luft fällt, so ergibt nach Ablauf der vorgesehenen Hubzahl — also beispielsweise 25 Doppelhübe — der mit dem Wasserstand in der Bürette korrespondierende Temperaturstrich der Skala direkt den Taupunkt.

Ebenso kann man leicht eine Tabelle für die Tropfenzählung etwa pro Doppelhub herstellen, wenn der Tropfenwert für das Instrument bestimmt ist.

Es war ursprünglich vorgesehen, das Hygrometer die Bewegungen mit Hilfe des Kühlwassers selbsttätig ausführen zu lassen, indem das Kühlwasser nach dem Verlassen des Kühlers durch eine Wippe alternierend auf zwei Kolben aufgegeben werden sollte. Die Kolben sollten durch das Gewicht des Wassers die Auf- und Abwärtsbewegung der mit ihnen verbundenen Meßglocken bewirken. Diese Anordnung hat sich aber insbesondere deshalb nicht bewährt, weil mit zunehmender Verstaubung der Anschlußleitungen der zu überwindende Widerstand zu sehr zunahm, als daß er mit den vorgesehenen Dimensionen überwunden werden konnte. Es wurde deshalb die Bewegung in der Weise durchgeführt, daß von Hand Gewichte — etwa 600 bis 700 g — auf die Meßglocken gelegt und nach Beendigung des Hubes gewechselt wurden. Diese Methode bot zugleich den Vorteil, daß die Vorgänge in den Leitungen, Kühler usw. einer empfindlichen Kontrolle unterlagen. Es traten zum Teil erhebliche Depressionen während des Hubes auf, so daß zwischen jedem Hub eine kleine Pause zum Ausgleich erforderlich wurde. Am Wasserstandsglas konnte aber beobachtet werden, ob dieser Ausgleich wirklich eingetreten war. Die sonstige Überwachung des Apparates ist ziemlich einfach; ob Undichtheiten vorhanden sind, läßt sich leicht feststellen, indem man an beliebiger Stelle die Leitung verschließt und die Meßglocken beschwert.

Die Aufstellung des Apparates erfolgt am besten in nächster Nähe der Abzapfstelle. Jedoch hat die Erfahrung gelehrt,

daß bei der Verwendung von Gummileitungen (20 mm lichter Durchmesser) auch Entfernungen von 2 bis 3 m ohne Schwierigkeiten zulässig sind. Es hat sich bei wiederholten Versuchen — speziell in Brikettfabriken — ergeben, daß die Schläuche inwendig staubtrocken waren. Es empfiehlt sich natürlich, sie so zu legen, daß ein stetiges Gefälle nach einer Seite in ihnen vorhanden ist, da bis zur vollständigen Durchwärmung Kondensationen eintreten.

Im Kühler zeigen sich nur verhältnismäßig geringe Wasseransammlungen auf dem Boden in der Nähe des Lufteintrittes; in den Kühlrohren und an den sonstigen Flächen haftet nur ein leichter Hauch Wasser; dasselbe gilt von den Verunreinigungen des Wrasens.

Sie setzten sich zum Teil in den Zuleitungen fest, was sich durch Anbringen eines Staubabscheideraumes vermindern ließe, zum größten Teile aber wurden sie unmittelbar an der Eintrittsstelle der Luft niedergeschlagen. Oberhalb der ersten Rohrreihen und weiterhin war die Staubabscheidung unbedeutend. Einen Einfluß auf die Wirkungsweise des Apparates hat sie nur in ganz geringem Grade; die Filtration des Kondensats erfolgt so gut, daß das Wasser klar in die Bürette abtropft; die Leistungsfähigkeit des Kühlers aber wird durch die Verschmutzung kaum beeinträchtigt, da es bei dem an sich schon schlechten Wärmeübertragungskoeffizienten, der sich nur auf etwa 6 belaufen dürfte, auf die Wärmeleitfähigkeit der Wandungen nicht so sehr ankommt.

Hat man den Apparat ordnungsgemäß aufgestellt und auf Dichte geprüft, die Wasserverschlüsse gefüllt und auf die Marken eingestellt, so ist die Depression des Trockenraumes zu messen, indem zunächst der Wasserablauf im Tauchgefäß ohne Verbindung des Wasserstandsglases mit dem Trockenraum so eingestellt wird, daß der Wasserspiegel auf der Marke einsteht; nach dem Anschluß des Wasserstandsglases an den Trockenraum wird, der Depression entsprechend, der Wasserspiegel gestiegen sein, was sich ja leicht messen läßt. Man hat ihn nun mittels des verstellbaren Ablaufes wieder auf die Marke zu senken und je nach der Höhe des Unterdruckes darüber Entscheidung zu treffen, ob der Luftauslaß mit dem Trockenraum in Verbindung gesetzt werden muß. Die spätere Rechnung wird hierfür Anhaltspunkte geben.

Nachdem weiter die Temperatur des Kühlwassers bestimmt und der Hub der Meßglocken dieser Temperatur entsprechend eingestellt wurde, kann der Apparat in Betrieb gesetzt werden. Es dauert zunächst einige Zeit, bis der Gleichgewichtszustand erreicht

ist, bis die Niederschläge in den Zuleitungen verschwunden sind und eine gleichmäßige Feuchtigkeitsschicht im Kühler vorhanden ist, und wenn man mehrere Messungen vornimmt, tut man gut, zwischen ihnen die Bewegung der Luft weiterzuführen; man kann sich aber leicht von der Sicherheit der Messung überzeugen, wenn man nicht nur am Ende der Messung, sondern in regelmäßigen Intervallen die Ablesungen anstellt und nur die Messung als richtig anerkennt, während deren Dauer keine allzu großen Schwankungen in den einzelnen Ablesungen eingetreten sind. Ist der Apparat aber einmal in den Beharrungszustand gekommen, so sind die Verschiedenheiten der Ablesungen die Folge des steten Schwankens von Temperatur und Sättigung in den Trockenapparaten.

Nach Beendigung der Messung ist die Umrechnung auf 1 kg Luft, Addition der Thermometerablesung oberhalb des Kühlers und Barometerkorrektion vorzunehmen.

Sehr wichtig ist es natürlich, daß sich während einer Messung die Temperatur des Kühlwassers nicht allzu sehr verändert, wenn man auch imstande ist, ohne Unterbrechung der Messung die Hubhöhe der Meßzylinder zu verstellen. Doch dürfte in den weitaus meisten Fällen dieser Bedingung durch Beschaffung von Leitungs- oder Brunnenwasser, Spritzwasserleitungen usw. genügt werden können. Ist doch der Wasserbedarf nicht groß, da pro Stunde nur rund 250 W.E. aufzunehmen sind, so daß man mit 100 Liter Wasser bequem auskommen kann.

Es ist nun erforderlich, sich darüber klar zu werden, welcher Grad von Genauigkeit sich mit dem Kondensationshygrometer erreichen läßt, und welchen Einfluß auf das Resultat die möglichen Fehler in der Behandlung und Einstellung des Apparates haben.

Die Untersuchung hat sich auf dreierlei zu erstrecken:

- Genauigkeit der Methode,
- Genauigkeit der Eichung,
- Genauigkeit der Einstellung.

Die theoretische Grundlage läßt sich rechnerisch gut verfolgen. Dagegen ist eine Klarheit schwer darüber zu erhalten, ob die Luft nach dem Austritt aus dem Kühler und in den Meßgefäßen wirklich gesättigt ist oder nicht. Für den Hub der Meßglocken ist das von keiner Bedeutung. Ist das Gewicht von 1 cbm Dampfluft bestimmt durch den Ausdruck:

$$\gamma'' = \frac{h}{735,5} - \Delta q$$

(vergl. „Hütte“ I, S. 322), so ist der Wert Aq , der sich allein mit der Sättigung der Luft verändert, maximal, und zwar für 20° gleich 0,008. Bei $q = 0,9$ würde sich also der wirkliche Wert vom angenommenen um weniger als 0,001 unterscheiden und demnach entsprechend das Resultat um weniger als $1 \frac{0}{100}$ beeinflussen.

Die Frage, ob die Luft beim Verlassen des Kühlers gesättigt ist oder nicht, ist von größerer Bedeutung bei der Feststellung des Wassergehaltes, den die Luft aus dem Kühler mit sich trägt. Bei 25° und $q = 0,9$ beträgt dann der Unterschied im Wassergehalt pro 1 kg Luft bereits 2,4 g, bei 20° noch 1,7 g, bei 15° nur noch 1 g. Man wird also gut tun, nicht nur Kühlwasser von möglichst niedriger Temperatur zu verwenden, sondern auch die Kühlfläche so groß machen, daß die Dampfluft bis annähernd an diese Temperatur heruntergekühlt wird. An sich könnte man eine wesentliche Vereinfachung und Verbilligung des Apparates dadurch erzielen, daß man mittels Oberflächenkühlung nur bis unterhalb des Taupunktes arbeitet, die Temperatur hierauf abliest und die Luft dann mittels eines feinen eingespritzten Wasserregens vollends abkühlt und sättigt; bei höheren Temperaturen werden die Meßfehler aber schon recht groß, wenn die Dampfluft nicht voll, sondern nur etwa zu $90 \frac{0}{100}$ gesättigt ist.

Aus den bisherigen Versuchen konnte diese Frage nicht beantwortet werden. Der Flüssigkeitsstand in den Wasserverschlüssen blieb konstant, so daß wochenlang eine Änderung insbesondere an den Saugverschlüssen nicht nötig war. Man wird das wohl mehr als Beweis dafür ansehen können, daß die Luft nicht vollständig gesättigt war. Denn in dem Falle hätte eine Kondensation erfolgen müssen, da die Temperatur im Raum etwas niedriger war, als die Endtemperatur der Dampfluft hinter dem Kühler, und da in dem metallenen Verbindungsrohr eine beträchtliche Wärmeentziehung eintreten konnte. Erscheint nun auch die Annahme einer Sättigung von nur $90 \frac{0}{100}$ übertrieben gering, so muß man doch damit rechnen, daß sie nicht $100 \frac{0}{100}$ war. Wenn man also $95 \frac{0}{100}$ annimmt, so wird man bei 25° Abgangstemperatur eine Fehlermöglichkeit von $\sim 1,2$ g haben, gegenüber dem Gesamtwassergehalt wenig, und man kann durch Verwendung kälteren Kühlwassers diese Ungenauigkeit ziemlich ganz verschwinden lassen. Für normale Messungen, bei denen der Hauptwert auf den Wärmeverbrauch pro 1 kg verdampftes Wasser zu legen ist, verringert sich der Ungenauigkeitsgrad dadurch wesentlich, daß mit den Werten für d auch die für J und c , steigen

und fallen. Da der Wärmeverbrauch für 1 kg verdampftes Wasser sich durch den Wert:

$$\frac{J + c_r (t - t_s)}{d} \cdot 1000$$

bestimmt, so gleicht sich der Fehler in der Berechnung von d zum weitaus größten Teile wieder aus. Man kann deshalb für normale Zwecke die Luft als vollständig gesättigt betrachten, und wird nur aus besonderen Gründen eine geringere relative Feuchtigkeit — etwa 95 $\frac{0}{100}$ — annehmen.

Eine Fehlermöglichkeit ist gegeben, wenn die Luft nicht wirklich die angenommene Temperatur besitzt, also beim Austritt aus dem Kühler eine fehlerhafte Temperaturmessung eingetreten ist oder in den Meßglocken die Luft nicht die Temperatur des Kühlwassers hat.

Das letztere ist höchst unwahrscheinlich, da die Kühlfläche der Meßglocke etwa 0,15 qm beträgt und bereits mit 0,7 qm im Kühler die Hauptkühlung erledigt ist; es erübrigt sich auch eine Besprechung deshalb, weil der Effekt derselbe ist wie die später zu behandelnde fehlerhafte Temperatureinstellung.

Eichungsfehler können durch fehlerhafte Messung der Volumina entstehen. Sind sie in der Messung der schädlichen Räume vorgekommen, so können sie das Resultat nur ganz unwesentlich beeinflussen, da die schädlichen Räume während der Saug- und Druckperiode gleich sind. Nimmt man an, daß der Differenz die recht beträchtliche Größe von $\pm 100 \text{ ccm} = 0,1 \text{ Liter}$ innewohne, so ist der Fehler (vergl. S. 26):

$$0,1 (\gamma'' \cdot \frac{10323}{10000} - A - \gamma) - 0,1 (\gamma'' \cdot \frac{10343}{10000} - A - \gamma)$$

und erreicht bei 0° seinen Höchstwert von 0,0003 oder, da die rechte Seite der Gleichung S. 27 10 g ist, einen Relativwert von 0,00003, der nicht zum Ausdruck kommt. Ein derartig hoher Fehler, wie 100 ccm, kann nur dadurch entstehen, daß der Wasserspiegel falsch übertragen ist, und zwar würde er entstanden sein, wenn bei 169,72 qcm Querschnittsfläche einer Meßglocke eine Abweichung von 3 mm vom richtigen Wert vorgekommen wäre. Der Fehler ist so klein, daß auch bei doppelter und dreifacher Größe, d. i. bei einem um rund 1 cm falschen Wasserstand, die Genauigkeit der Messung nicht leidet.

Die Übertragung der Teilung auf die Skala mittels Teilmaschine ist so genau, daß die dabei möglichen Fehler nicht ins Gewicht fallen können.

Es würde nun weiter erforderlich sein, die Fehler zu berücksichtigen, die sich durch unrichtige Einstellung ergeben können.

1. Ungenauigkeit beim Einstellen des Wasserspiegels ist bedeutungslos, da selbst die außerordentliche Abweichung von 10 mm noch nicht das Resultat beeinflusst. Eine Ungenauigkeit wird besonders dann leicht eintreten, wenn im Trockenraum Unterdruck herrscht; es gehört aber sicher besondere Unaufmerksamkeit dazu, eine Abweichung von 10 mm am Wasserstandsglas nicht zu bemerken.

2. Unrichtiger Wasserstand in den Wasserverschlüssen. Es soll angenommen werden, daß derselbe um ± 5 mm schwankt, und es kann der Fall eintreten, daß Saug- und Druckverschlüsse in demselben und im entgegengesetzten Sinn variieren; die Fehler werden am größten sein, wenn das Volumen am größten ist, also bei 20°, und zwar läßt sich leicht erkennen, daß das Maximum erreicht wird, wenn in beiden Verschlußarten der Wasserstand zu hoch ist, was etwa 2 $\frac{0}{100}$ austragen würde.

In ähnlicher Weise wirkt es, wenn der Druck im Trockenraum unter dem atmosphärischen liegt, die Luft aber nicht in den Trockenraum, sondern in die Atmosphäre ausgestoßen wird; bei dem hohen Werte von 10 mm Wassersäule Unterdruck z. B. wird dann der Druck nach dem Saughub sein 1,0313, nach dem Druckhub wie sonst 1,0343; der Fehler beträgt rund 2 $\frac{0}{100}$; bei Verbindung beider Fehler, also zugleich um 5 mm zu hohem Wasserstand, wird dann der Druck nach dem Saugen sich auf 1,0308, nach dem Drücken auf 1,0348 stellen; der Fehler beträgt 4 $\frac{0}{100}$, und wenn man entsprechend dem Unterdruck von 10 mm das Resultat mit $\frac{10333}{10323}$ multipliziert, so reduziert er sich auf 3 $\frac{0}{100}$.

3. Unrichtige Einstellung der Hubhöhe hat Fehler zur Folge, die sich annähernd wie die Hubhöhen verhalten. Am größten wird die Abweichung bei gleichem Betrag der falschen Einstellung dann sein, wenn das dadurch beeinflusste Luftgewicht am größten ist, also bei niedrigen Temperaturen. Die Differenz ist dann, wenn D der Unterschied der wahren und richtigen Hubhöhe in Zentimeter ist:

$$\frac{2 D 169,72}{1000} \left(\gamma'' \frac{10323}{10000} - \gamma' \right)$$

und der relative Fehler gleich dem zehnten Teil hiervon. Z. B. bei 10° ist die Differenz 0,435 D , und der Fehler ist 0,0435 D . Bei einer Differenz von 2°, also rund 2 mm, ist demnach der Fehler

0,0087, unter 1 ‰, bei einer Differenz von 1 ° nur 4,35 ‰. Es ist aber natürlich nicht schwer, die Messung der Kühlwassertemperatur einwandfrei vorzunehmen, und ebenso ist der Skalaabstand von 1 mm pro 1 ° vollständig genügend, um selbst Zehntelgrade zu berücksichtigen.

Aus diesen Ausführungen kann man ersehen, daß es keiner übermäßigen Vorsicht und Aufmerksamkeit bedarf, um mit dem betriebenen Apparat brauchbare Messungen vorzunehmen. Die größte Fehlerquelle liegt in der Unklarheit darüber, wie weit die Luft wirklich gesättigt ist. Man kann sich aber hierüber hinweghelfen, wenn man für niedrige Kühlwassertemperatur sorgt; für Untersuchungen über Wärmeökonomie ist dieser Punkt aber gegenstandslos.

Bedauerlicherweise war es dem Verfasser nicht möglich, einen Vergleich mit einem Haarhygrometer vorzunehmen; es lag das einmal daran, daß in den besuchten Brikettfabriken derartige Apparate nicht vorhanden waren, dann auch daran, daß bei den starken Schwankungen insbesondere in den Sättigungen ein genauer Vergleich beider Instrumente nur in einem besonderen Versuchsstand hätte vorgenommen werden können. Sonst wären Differenzen dadurch möglich, daß beim Kondensationshygrometer die Messung direkt über längere Zeiträume ausgedehnt wird, während beim Haarhygrometer eine Summe von Einzelmessungen erforderlich ist, wobei es natürlich einen Vorteil des ersten Verfahrens darstellt, daß bereits Durchschnittsergebnisse, Integrationen nach der Zeit, geliefert werden.

C) Ausgeführte Untersuchungen.

Von ausgeführten Untersuchungen ist in die Öffentlichkeit eigentlich nur die Randhahns gekommen, die sich auch in Franke, Handbuch der Brikettfabrikation, Berlin 1909, S. 414, findet. Wenn man auch den darin gewonnenen Resultaten nicht ganz beistimmen kann, so ist doch immerhin von großem Wert, daß überhaupt ein Anhalt für die Wärmeökonomie einer Anlage vorhanden ist. Die von Randhahn angeführte Untersuchung hatte Teller Trockner zum Gegenstand; über Röhrentrockner dagegen liegen Berichte nicht vor.

Nun aber bieten vom wärmetechnischen Standpunkt aus gerade diese Interesse. Im Teller Trockner ist eine regelmäßige und zwangsweise Verbindung der einzelnen Teller nicht vorhanden, wenigstens nicht in der Art, daß der eine vom andern abhängig ist, sondern es ist mehr dem Zufall überlassen, welches Luftquantum zu den

einzelnen Tellern gelangt; die Überwachung der rotierenden Teile bedingt ein häufiges Öffnen der Türen und damit eine Unterbrechung der Luftzirkulation.

So wichtig ja nun auch praktisch der Zustand der aus dem Apparat entweichenden Dampfluft ist, so bietet er doch aus den angeführten Gründen theoretisch kein Interesse.

Solches kann sich nur — wenn man sich auf Braunkohle beschränkt — dem Röhrentrockner zuwenden. Nur hier ist ein kontinuierlich fortschreitender Vorgang vorhanden, der zudem für die Untersuchung den Vorteil bietet, daß Wärmeverluste durch Strahlung und Berührung nach der Umgebung im eigentlichen Trockenbetrieb nicht vorkommen können. Beschränkt man sich auf diesen, so ist der Anfangszustand beim Eintritt in den Apparat und der Endzustand beim Verlassen desselben leicht und sicher zu bestimmen; die Deckung der bei diesem Vorgang wie bei jedem anderen natürlich vorhandenen allgemeinen Verluste wird durch die Mantel- und Stirnfläche der Apparate geleistet.

Der Röhrentrockner hat sich in seinen wesentlichen Abmessungen noch so erhalten, wie ihn Schulz im Jahre 1883 in die Praxis einführte. Insbesondere die Länge der Heizrohre — 7 m — und der lichte Durchmesser derselben — 95 mm — sind im allgemeinen gewahrt geblieben. Verändert hat sich die Größe des Apparates selber, indem immer mehr Rohre in einer Trommel vereinigt wurden, der Dampfdruck und die Dampfgeschwindigkeit; die beiden letzteren vornehmlich zu dem Zwecke, auf die Gewichtseinheit Kohle und Flächeneinheit der Heizkörper möglichst viel Wärme zuführen zu können. Die Einführung der Wendeleisten brachte sowohl eine Vergrößerung der Heizfläche als auch eine Vermehrung des Inhalts mit sich. Die neueren Beschickungsvorrichtungen, insbesondere die Rolffsche Einblasevorrichtung, verfolgen zunächst den Zweck, eine größere Menge Kohle in die Rohre einzuführen; in Verbindung hiermit steigt auch die Heizfläche, es tritt aber außerdem infolge der mechanischen Einwirkung des Luftstromes eine Einebnung des Materials und damit weitere Vergrößerung der Heizfläche ein; durch die injektorartige Wirkung der einströmenden Luft wird ferner erzielt, daß auch eine genügende Luftmenge den Trockner durchströmt. Rücksichten auf die Staubbeseitigung haben in letzter Zeit zu Entstaubungssystemen geführt, bei denen der Abzug des Wrasens nicht dem natürlichen Auftrieb überlassen, sondern zwangsweise mittels Ventilators bewerkstelligt wird (System Beth, Michaelis, Scheibe usw.).

Es ist hier nicht der Ort, eine Beschreibung der erwähnten Einrichtungen zu geben, die zudem als bekannt vorausgesetzt werden können. Vom wirtschaftlichen Standpunkt aus interessieren nun besonders die Unterschiede in den Ergebnissen, die bei der üblichen Anordnung und bei den Systemen auftreten, die eine Mehrleistung durch vergrößerte Füllung erzielen wollen, sowie denjenigen, bei denen der natürliche Luftzug durch künstlichen ersetzt wird, wodurch zugleich eine leichtere Beeinflussung und Regelung der durchziehenden Luftmengen ermöglicht ist.

Vertreter dieser drei Gattungen sind die Werke, auf denen vom Verfasser Versuche vorgenommen wurden:

1. Millygrube der Braunkohlen- und Brikett-Industrie, Akt.-Ges., Bockwitz bei Mückenberg (N.-L.); normale Anordnung und Einrichtung.

2. Die Brikettfabrik der A.-G. Lauchhammer in Lauchhammer (N.-L.), deren Apparate mit der Rolffschen Einblasevorrichtung versehen sind.

3. Die Brikettfabrik der Akt.-Ges. Grube Leopold zu Edderitz in Holzweißig bei Bitterfeld mit Entstaubungssystem Michaelis.

Es sei an dieser Stelle den Verwaltungen der genannten Werke für ihre freundliche Bereitwilligkeit und liebenswürdige Unterstützung bestens gedankt. Da die letztgenannte Fabrik noch nicht im regelmäßigen Betriebe war, ließen sich allgemein verwertbare Ergebnisse hier nicht gewinnen.

Die Untersuchung mußte sich auf folgende Punkte erstrecken:

1. Die Leistung der Apparate. Bei bekannter Heizfläche und der leicht festzustellenden Produktion an Briketts wird die Leistung pro Quadratmeter Heizfläche ermittelt. Diese Zahl ist aber zu klein, da ein ziemliches Quantum feinen Staubes nicht mit zur Pressung gelangt, vielmehr teils mit kondensierendem Wrasen niedergeschlagen wird, teils durch den Schlot entweicht. Diese Menge läßt sich naturgemäß nicht genau feststellen, sondern wurde den Annahmen der Verwaltungen gemäß in Rechnung gestellt. Aus dem Wassergehalt von Rohkohle und Briketts wird das auf 1 qm Heizfläche bzw. pro Rohr verdampfte Wasserquantum festgestellt, ebenso sind hiermit die spezifischen Wärmen des Trockenguts (vergl. S. 4) bekannt.

Aus der Durchsetzzeit, die zum Durchlaufen der Rohre benötigt wird, läßt sich die Füllung der Rohre und der Teil der Heizfläche berechnen, der seine Wärme an die Kohle selbst abgibt.

Diese Rechnung ist allerdings recht ungenau; sie erfolgte nach den Angaben Gräfes („Braunkohle“ 1910, Heft 11), wonach das Volumen von 1 kg Rohkohle etwa 1,6 Liter beträgt, nach dem Trocknen aber auf 1 Liter zurückgeht. Innerhalb ziemlich weiter Grenzen dürfte das auch ein richtiger Durchschnitt sein; es ist sehr schwierig, eine genauere Entscheidung zu treffen, da man durch mehr oder weniger starkes Schütteln das Volumen recht beträchtlich zu verändern mag. Die Messung in den Rohren selbst ist dadurch erschwert, daß am Eintrittsende die Kohle ganz unregelmäßig geschüttet liegt, während am Ausfall die Ausfallkapseln das Bild verändern. Beträchtliche Unterschiede in dem Verhalten der verschiedenen in Frage kommenden Kohlsorten waren nicht wahrzunehmen, so daß ungenaue Annahmen keinen bedeutenden Einfluß ausüben können. Aus dem Volumen der Kohle ergibt sich dann weiter der von ihr ausgefüllte Querschnitt und der Luftquerschnitt, der zur Berechnung der Luftgeschwindigkeit dient.

Die Messung selbst bestand in der Feststellung des Wärmehaltendes von Kohle und Luft beim Eintritt in das Rohr und beim Austritt aus demselben. Es wurde die Temperatur der Außenluft und ihr Sättigungsgrad und weiter die Temperatur der Luft vor dem Eintritt in die Trockenapparate ermittelt, die bereits wesentlich höher ist als die Außentemperatur. Es wird der Luft Gelegenheit geboten, durch das Vorbeistreichen an Pressen, Dampfleitungen, Trockenschnecken und besonders an den Mänteln der Trockenapparate selbst Wärme aufzunehmen, die sonst nutzlos verloren gehen würde. Beim austretenden Wrasen wurde festgestellt die Temperatur unmittelbar beim Verlassen der Rohre und die Zusammensetzung des DampfLuftgemisches mittels des Kondensationshygrometers, sowie die Temperatur der getrockneten Kohle.

Leider war die letztere Messung nur sehr ungenau auszuführen, obwohl gerade die Temperatur der Trockenkohle auf den Trockenprozeß, seine Schnelligkeit und Wirtschaftlichkeit, den weitestgehenden Einfluß ausübt, wie sich später zeigen wird. Es ist auch nicht möglich, die Temperatur mittels eines gewöhnlichen Thermometers in den Rohren selbst festzustellen, da der Querschnitt der Kohle zu gering ist, um das Instrument ganz darin unterzubringen; es wird entweder von der Heizfläche selbst oder durch die heiße Luft eine Beeinträchtigung eintreten. Es ist auch nicht möglich, die herabrieselnde Kohle in einem Gefäß aufzufangen, da die gekrümmten Rohre zur Ableitung des Kondenswassers im Wege sind; man kann deshalb nur so verfahren, daß beim Einfall in die Haupttrockenschnecke

Kohle herausgenommen und in ein Gefäß gebracht wird, um sodann die Temperatur zu bestimmen. Diese Art ist naturgemäß eine sehr mangelhafte; einerseits geht die Wärmeübertragung auf das Thermometer sehr langsam vor sich, andererseits aber tritt eine schnelle Temperaturenniedrigung des Trockengutes ein, da eine sehr lebhafte Nachverdampfung stattfindet und die hierfür erforderliche Verdampfungswärme in der Hauptsache durch das Trockengut mit geringer Wärmekapazität geleistet werden muß. Es ist aber weiter nicht möglich, eine scharfe Trennung der Temperaturen, die die Kohle des untersuchten Apparates und der anderen Apparate besitzen, vorzunehmen. Insbesondere dann ist dies unangenehm, wenn bei vorgenommenen Veränderungen irgend welcher Verhältnisse am untersuchten Apparat zugleich eine Änderung der Temperatur der austretenden Kohle zu erwarten steht. Kommt es lediglich auf die Berechnung der Wärmeökonomie an, so ist eine derartige Ungenauigkeit vollkommen belanglos.

Kennt man so den Zustand der an dem Vorgang beteiligten Substanzen, so kann mittels der Tabellen ermittelt werden, wieviel Wärme in einem Dampfgemisch mit 1 kg trockener Luft beim Ein- und Austritt enthalten ist; die Differenz ist die im Heizrohr zugeführte Wärme; da man leicht berechnen kann, wieviel Kilogramm trockene Luft zur Aufnahme von 1 kg Wasserdampf erforderlich sind, ist auch die Berechnung möglich, welche Wärmemenge zur Verdampfung von 1 kg Wasser verbraucht wurde. Da ferner aus dem bekannten Wassergehalt der Rohkohle und Trockenkohle deren spezifische Wärmen und Mengenverhältnisse im Vergleich zum verdampfenden Wasser gegeben und die Temperaturen gemessen sind, kann die Gesamtbilanz aufgestellt werden. Rechnet man weiter die auf ein Rohr zugeführte Wärmemenge aus, so kann die Wärmeübertragung der Heizfläche ermittelt werden; aus der gefundenen Luftmenge ergibt sich weiter deren Volumen und die Geschwindigkeit, die das Dampf-Luftgemisch beim Eintritt und beim Austritt aus dem Apparat besitzt. Der Gang der Rechnung ist genauer aus den Tabellen über die Resultate der Untersuchungen (Millygrube S. 42 und 43, Lauchhammer S. 46 und 47) ersichtlich.

a) Millygrube bei Mückenbergr, N.-L.

Die Apparate waren mit Wendeleisten ausgestattet und besaßen eine Neigung von 5°. Die minutliche Umdrehungszahl war etwa 7,5.

Wassergehalt der Rohkohle 57 %.

Wassergehalt der Briketts 13 %.

Auf 1 kg Trockenkohle sind 1,023 kg Wasser zu verdampfen.
Heizfläche 8800 qm.

Leistung pro Tag 750 000 kg Briketts.

Leistung pro Quadratmeter Heizfläche und Stunde 3,55 kg Briketts.

Nicht zu Briketts verarbeiteter Staub 6 %.

Leistung auf 1 qm Heizfläche und Stunde: 3,76 kg Trockenkohle; 3,86 kg verdampftes Wasser; 7,62 kg Rohkohle.

Ein Heizrohr hat 7 m Länge und 95 mm Durchmesser, demnach 2,09 qm Heizfläche und 70,88 qcm Querschnitt. Es leistet pro Stunde: 7,85 kg Trockengut, 8,06 kg Wasser und verbraucht 15,9 kg Rohkohle.

Bei 25 Minuten Durchsetzzeit enthält es eine Kohlenmenge entsprechend 6,64 kg Rohkohle. Das Volumen dieser ist 10,6 Liter im nassen und 6,6 Liter im getrockneten Zustand. Daraus folgt die Querschnittsverteilung:

Beim Einlauf: 15,15 qcm für Kohle und 55,73 qcm für Luft.
Beim Austrag: 9,44 qcm für Kohle und 61,44 qcm für Luft, und hieraus weiter die Bogenhöhe der Kohle beim Eintritt zu 2,52 cm, beim Austritt 1,84 cm, die Bogenlänge für Kohle beim Eintritt zu 10,28 cm, beim Austritt zu 8,62 cm, und hieraus die mittlere Heizfläche eines Rohres gegen Kohle zu 0,66 qm = 31,75 % der gesamten Heizfläche, gegen Luft zu 1,43 qm = 68,25 % der gesamten Heizfläche. Spezifische Wärme der Rohkohle = $0,20 + 0,80 \cdot 0,57 = 0,656$, der Trockenkohle = $0,20 + 0,80 \cdot 0,13 = 0,304$.

Eine gewisse Schwierigkeit bot, wie auch in den sonstigen Versuchen, die Beschaffung des Kühlwassers, das aus den Spritzwasserleitungen entnommen wurde. Es wärmte sich beim Durchgang durch die warmen Fabrikgebäude stark an, wenn lediglich das zum Versuch benötigte Quantum entnommen wurde, es versagte aber auch häufig, wenn es zum Spritzen verwendet wurde. So war es nicht möglich, den starken Schwankungen zu folgen, die der Zustand des Wrasens im Laufe der Tageszeiten erlitt und die sich vornehmlich durch Temperaturabweichungen zu erkennen gaben. So ging die Temperatur des Wrasens zeitweilig auf 95° zurück, ohne daß es möglich war, eine Bestimmung vorzunehmen. Es ist ja ganz natürlich, daß die Luftmenge bei fester Einstellung der Schieber und sonst konstanten Verhältnissen schwanken muß, wenn atmosphärische Veränderungen eintreten und insbesondere auch, wenn der Eintrittsquerschnitt in den Rohren sich bei verschiedener

Millygrube.

| | Versuch 1 | Versuch 2 | Versuch 3 |
|--|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Tag | 15. Oktober 1910 | 17. Oktober 1910 | 17. Oktober 1910 |
| Barometerstand | 769 mm Q.S. | 763,3 mm | 763 mm |
| Dampfdruck | 3,6/3,8 Atm. abs. | 3,6/3,8 Atm. | 3,6/3,8 Atm. |
| Depression im Trockenraum | 1 mm W.S. | etwa 1 mm W.S. | etwa 1 mm W.S. |
| 1. Beim Eintritt. | | | |
| Temperatur der Außenluft | 10° | 10° | 10° |
| Geschätzter Taupunkt | 8° | 8° | 8° |
| " " <i>d</i> | 6,65 g | 6,65 g | 6,65 g |
| " " <i>J</i> | 5,9 W.E. | 5,9 W.E. | 5,9 W.E. |
| " " <i>c_r</i> | 0,2407 W.E. | 0,2407 W.E. | 0,2407 W.E. |
| Wärmeinhalt pro 1 kg Luft und Dampf | 6,4 W.E. | 6,4 W.E. | 6,4 W.E. |
| Durch Berührung und Strahlung ist die Luft beim Eintritt in den Trockner vorgewärmt auf | 30° | 30° | 30° |
| Wärmeinhalt pro 1 kg Luft und Dampf beim Eintritt | 11,2 W.E. | 11,2 W.E. | 11,2 W.E. |
| Volumen pro 1 kg Luft und Dampf beim Eintritt (30°) | 0,857 cbm | 0,863 cbm | 0,864 cbm |
| Temperatur der Kohle beim Eintritt | 10° | 10° | 10° |
| Wärmeinhalt von 1 kg Rohkohle | 6,6 W.E. | 6,6 W.E. | 6,6 W.E. |
| 2. Beim Austritt. | | | |
| Kondensat: 25 Doppelhübe | 85,8 g | 84,2 g | 92 g |
| Auf 1 kg trockene Luft | 343,2 g | 336,8 g | 368 g |
| Abzugstemperatur vom Kühler | 25° | 22° | 26° |
| Entsprechender Zuschlag | 20 g | 16,6 g | 21 g |
| Barometerkorrektur | — 9·0,013 | — 3,3·0,013 | — 3·0,013 |
| " | — 1,2 ⁰ / ₁₀ | — 0,43 ⁰ / ₁₀ | — 0,4 ⁰ / ₁₀ |
| " | — 4,3 g | — 1,5 g | — 1,5 g |
| Taupunkt " (rechnerisch) <i>ts</i> | 358,9 g | 351,9 g | 387,5 g |
| " " <i>J</i> | 74° | 73,7° | 75,1° |
| " " <i>c_r</i> | 243,5 W.E. | 239 W.E. | 261,4 W.E. |
| " " | 0,4090 W.E. | 0,4057 W.E. | 0,4222 W.E. |

| | Versuch 1 | Versuch 2 | Versuch 3 |
|---|---------------|---------------|---------------|
| Austrittstemperatur des Wrasens | 100° | 100° | 101,5° |
| Wärmeinhalt auf 1 kg Luft und Dampf | 253,8 W.E. | 249,6 W.E. | 272,5 W.E. |
| Also zugeführt auf 1 kg Luft | 242,6 W.E. | 238,4 W.E. | 261,3 W.E. |
| Volumen pro 1 kg Luft und Dampf | 1,647 cbm | 1,645 cbm | 1,714 cbm |
| Auf 1 kg Luft ist aufgenommen Wasser | 352,3 g | 345,3 g | 380,9 g |
| Um 1 kg Wasser zu verdampfen war erforderlich trockene Luft | 2,84 kg | 2,90 kg | 2,62 kg |
| Auf 1 kg Wasser wurden im Rohr aufgenommen | 690 W.E. | 692 W.E. | 684 W.E. |
| Und durch Vorwärmung | 13,6 W.E. | 13,9 W.E. | 12,6 W.E. |
| Im ganzen verbraucht | 703,6 W.E. | 705,9 W.E. | 696,6 W.E. |
| Beobachtete Temperatur der Trockenkohle | — | 82° | 82° |
| Wahrscheinliche Temperatur | 81,5° | 82° | 82,5° |
| 1 kg Trockenkohle enthält | 25 W.E. | 25 W.E. | 25 W.E. |
| Auf 1 kg Wasser entfällt Trockenkohle | 0,98 kg | 0,98 kg | 0,98 kg |
| Mit | 24,4 W.E. | 24,4 W.E. | 24,4 W.E. |
| Auf 1 kg Wasser entfällt Rohkohle | 1,98 kg | 1,98 kg | 1,98 kg |
| Mit | 13 W.E. | 13 W.E. | 13 W.E. |
| Also Zuwachs im Trockengut | 11,4 W.E. | 11,4 W.E. | 11,4 W.E. |
| Zusammen für die Verdampfung von 1 kg Wasser verbraucht | 715 W.E. | 717,3 W.E. | 708 W.E. |
| Verlust | 21 0/10 | 21,5 0/10 | 20 0/10 |
| Wärmeabgabe pro Quadratmeter Heizfläche und Stunde | 2705 W.E. | 2720 W.E. | 2685 W.E. |
| Wärmeabgabe pro Rohr und Stunde | 5660 W.E. | 5680 W.E. | 5625 W.E. |
| Pro Rohr und Stunde erforderliche trockene Luft | 22,9 kg | 23,4 kg | 21,1 kg |
| Volumen beim Eintritt | 19,6 cbm | 20,20 cbm | 18,50 cbm |
| Luftgeschwindigkeit beim Eintritt | 0,99 m/sek | 1,01 m/sek | 0,91 m/sek |
| Volumen beim Austritt | 37,7 cbm | 38,5 cbm | 36,2 cbm |
| Luftgeschwindigkeit beim Austritt | 1,7 m/sek | 1,76 m/sek | 1,64 m/sek |
| Spannung des Wasserdampfes | 276,6 mm Q.S. | 273,2 mm Q.S. | 289,7 mm Q.S. |
| Spannung des Wasserdampfes korrigiert | 280 mm Q.S. | 274,2 mm Q.S. | 291 mm Q.S. |
| Taupunkt korrigiert | 74,3° | 73,8° | 75,2° |
| Eintrittsöffnung für die Luft rechteckig | 650·550 mm | 650·550 mm | 550·550 mm |
| Geschwindigkeit der Luft in der Eintrittsöffnung | 3,68 m/sek | 3,80 m/sek | 4,12 m/sek |

Beschaffenheit der Kohle, die bald nasser bald trockener fällt, ändert. Aus diesem Grunde ist auch der Vorgang in den verschiedenen Trockenapparaten einer Fabrik nicht der gleiche, und auch hierin ist ein Grund dafür zu suchen, daß die Feststellung der Kohlentemperaturen so unbefriedigend ausfiel und nicht die Verschiedenheiten ergab, die man erwarten sollte.

Die gewonnenen Daten zeigen, daß die Verhältnisse weit besser sind, als im allgemeinen angenommen wird. Es fragt sich nun, wie groß die Verluste sind, die sonst noch entstehen. Wenn die zutretende Luft, wie es richtig und üblich ist, die Pressen bestreicht, dann an Trockenschnecken und Dampfleitungen vorbeigeführt wird und schließlich den Apparatmantel umspült, so hat sie bei ihrem Eintritt in den Trockenzyylinder diese Abwärmen nutzbar in sich aufgespeichert, und es bleibt als reiner Verlust nur der übrig, der infolge Wärmedurchgang durch die Außenwände der Fabrik verursacht und unvermeidlich ist. Denn auch die an die Decke abgegebene Wärmemenge ist nicht verloren, sondern teilt sich dem darauf ruhenden Kohlenvorrat mit. Wenn Türen und Fenster am Apparatboden sorgfältig geschlossen gehalten werden, kann dieser Verlust nur relativ ganz unbeträchtlich sein.

Um zu untersuchen, inwiefern aber doch eine Besserung der Wärmewirtschaft zu erzielen ist, wurde Versuch III angestellt, bei dem die Zutrittsöffnung für Luft von 0,3575 qm auf 0,303 qm verengt wurde.

Es ergab sich eine immerhin beachtenswerte Verbesserung in der Ausnutzung der Wärme, ohne daß allerdings nach der kurzen Beobachtungszeit bereits ein abschließendes Urteil möglich wäre. Insbesondere ließ sich aus der Verstellung nur eines Apparates nicht ermitteln, ob die Trockenwirkung etwa gelitten hat, wenn das auch nicht sehr wahrscheinlich ist; es wird dies in der Hauptsache davon abhängen, ob und welche Temperatursteigerung in der Kohle eingetreten ist. Aus den bereits erwähnten Gründen war die Messung aber nicht möglich.

b) Brikettfabrik der Aktiengesellschaft Lauchhammer in Lauchhammer.

Die Fabrik ist im wesentlichen wie die von Millygrube eingerichtet, die Rohre besitzen gleichfalls Wendeleisten, dagegen ist Rolfsche Einblasevorrichtung vorhanden.

Die Neigung der Apparate betrug 6° , ihre Umdrehungszahl $6\frac{3}{4}$ in der Minute.

Wassergehalt der Rohkohle 57 $\frac{0}{100}$.

Wassergehalt der Briketts 13,5 $\frac{0}{100}$.

Auf 1 kg Trockenkohle sind 1,01 kg Wasser zu verdampfen.
Heizfläche 4300 qm.

Leistung pro Tag 450 000 kg Briketts.

Leistung pro Quadratmeter Heizfläche und Stunde 4,35 kg Briketts.

Nicht zu Briketts verarbeiteter Staub etwa 5 $\frac{0}{100}$.

Leistung auf 1 qm Heizfläche und Stunde: 4,57 kg Trockenkohle, 4,62 kg verdampftes Wasser, 9,19 kg Rohkohle.

Leistung pro Heizrohr: 9,55 kg Trockenkohle, 9,65 kg verdampftes Wasser, 19,2 kg Rohkohle.

Bei 25 Minuten Durchsetzzeit ist die Querschnittsverteilung im Rohr: beim Einlauf 18,35 qcm Kohle, 52,53 qcm Luft,

beim Auslauf 11,46 qcm Kohle, 59,42 qcm Luft.

Die Bogenhöhe ist beim Eintritt 2,89 cm, beim Austritt 2,04 cm.

Die Bogenlänge ist beim Eintritt 11,1 cm, beim Austritt 9,24 cm.

Die mittlere Heizfläche eines Rohres beträgt gegen Kohle: 0,71 qm = 34 $\frac{0}{100}$, gegen Luft: 1,38 qm = 66 $\frac{0}{100}$.

Die spezifische Wärme der Rohkohle ist 0,656 W.E., der Trockenkohle 0,308 W.E.

Die Temperaturmessungen boten hier noch größere Schwierigkeiten als auf Millygrube. Es waren an den Abschlußtüren keine Schaulöcher vorhanden, durch die sich eine Beobachtung der Wrasentemperaturen hätte bewerkstelligen lassen, vielmehr mußten die Türen selbst geöffnet werden, wodurch natürlich ein erhebliches Maß von Ungenauigkeit bedingt war. Desgleichen konnten die Temperaturen der Trockenkohle nur am Ende der Schnecken ermittelt werden, so daß Unterschiede in der Arbeitsweise eines einzelnen Apparates nicht zu ermitteln waren. Bei Versuch 3 war die Blasestärke des Rolffschen Apparates etwas vermindert; der Erfolg war thermisch nicht beträchtlich, was allerdings auch an anderen Faktoren gelegen haben mag; denn zwischen dem vorübergehenden Versuch und dem mit verminderter Lufteinspritzung lag naturgemäß ein längerer Zeitraum. Immerhin ist auch hier nicht zu verkennen, daß eine Verringerung der Luftmenge wirtschaftlich nutzbringend war.

Überraschend groß ist die Steigerung der Leistung bei der Anwendung des Rolffschen Apparates, ohne daß der Nutzeffekt dabei gemindert würde. Man kann wohl annehmen, daß Unterschiede der Kohle selbst bei den beiden nur etwa 5 km voneinander ent-

Lauchhammer.

| | Versuch 1 | Versuch 2 | Versuch 3 |
|--------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Tag | 25. Oktober 1910 | 25. Oktober 1910 | 25. Oktober 1910 |
| Barometerstand | 774 mm Q. S. | 774 mm Q. S. | 774 mm Q. S. |
| Depression | kaum merkbar | kaum merkbar | kaum merkbar |
| Dampfdruck | 3,8 Atm. abs. | 3,85 Atm. abs. | 3,8 Atm. abs. |

1. Beim Eintritt:

| | | | |
|---|------------|------------|------------|
| Temperatur der Außenluft | 8° | 8° | 8° |
| Geschätzter Taupunkt | 5° | 5° | 5° |
| " " <i>d</i> | 5,4 g | 5,4 g | 5,4 g |
| " " <i>J</i> | 4,4 W. E. | 4,4 W. E. | 4,4 W. E. |
| " " <i>cr</i> | 0,2401 " | 0,2401 " | 0,2401 " |
| Wärmeinhalt pro 1 kg Luft und Dampf | 5,1 " | 5,1 " | 5,1 " |
| Durch Berührung und Strahlung ist die Luft vorgewärmt auf | 31° | 31° | 31° |
| Wärmeinhalt pro 1 kg Luft und Dampf beim Eintritt | 10,6 W. E. | 10,6 W. E. | 10,6 W. E. |
| Volumen der Einheit beim Eintritt | 0,853 cbm | 0,853 cbm | 0,853 cbm |
| Temperatur der Kohle beim Eintritt | 8° | 8° | 8° |
| Wärmeinhalt von 1 kg Rohkohle | 5,25 W. E. | 5,25 W. E. | 5,25 W. E. |

2. Beim Austritt.

| | | | |
|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Kondensat in 25 Doppelhüben | 78,85 g | 85,9 g | 90 g |
| Auf 1 kg trockene Luft | 315,5 " | 343,6 " | 360 " |
| Abzugstemperatur vom Kühler | 24° | 26,5° | 25° |
| Entsprechender Zuschlag | 18,8 g | 21,9 g | 20 g |
| Barometerkorrektur | — 14·0,013 | — 14·0,013 | — 14·0,013 |
| " | — 1,8 ⁰ / ₁₀ | — 1,8 ⁰ / ₁₀ | — 1,8 ⁰ / ₁₀ |
| " | — 5,7 g | — 6,6 g | — 6,7 g |
| <i>d</i> | 328,6 " | 358,9 " | 373,4 " |
| Taupunkt (rechnerisch) <i>t_s</i> | 72,6° | 74° | 74,6° |

| | Versuch 1 | Versuch 2 | Versuch 3 |
|--|---------------|---------------|---------------|
| <i>J</i> | 223,2 W.E. | 243,5 W.E. | 253,1 W.E. |
| <i>c_r</i> | 0,3939 " | 0,4090 " | 0,4161 " |
| Austrittstemperatur des Wrasens | 97° | 97° | 97° |
| Wärmeinhalt auf 1 kg Luft und Dampf | 232,8 W.E. | 252,9 W.E. | 262,5 W.E. |
| Also zugeführt | 222,2 " | 242,3 " | 251,9 " |
| Volumen von 1 kg Luft und Dampf | 1,57 cbm | 1,64 cbm | 1,65 cbm |
| Auf 1 kg Luft ist Wasser aufgenommen | 323 g | 353,5 g | 368 g |
| Um 1 kg Wasser zu verdampfen, waren trockene Luft erforderlich | 3,1 kg | 2,83 kg | 2,72 kg |
| Aus 1 kg Wasser werden im Rohr aufgenommen | 689 W.E. | 686 W.E. | 685 W.E. |
| Und durch Vorwärmung | 17 " | 15,6 " | 15,4 " |
| Im ganzen verbraucht | 706 " | 701,6 " | 700,4 " |
| Beobachtete Temperatur der Trockenkohle | 78° | — | — |
| Wahrscheinliche Temperatur | 80° | 81° | 81° |
| 1 kg Trockenkohle enthält | 24,6 W.E. | 24,9 W.E. | 24,9 W.E. |
| Auf 1 kg Wasser entfällt Trockenkohle | 0,99 kg | 0,99 kg | 0,99 kg |
| Mit | 24,3 W.E. | 24,6 W.E. | 24,6 W.E. |
| Auf 1 kg Wasser entfällt Rohkohle | 2 kg | 2 kg | 2 kg |
| Mit | 10,5 W.E. | 10,5 W.E. | 10,5 W.E. |
| Also Zuwachs im Trockengut | 13,8 " | 14,1 " | 14,1 " |
| Zusammen für die Verdampfung von 1 kg Wasser verbraucht | 720 " | 715,5 " | 714,5 " |
| Verlust | 22° | 21° | 21° |
| Wärmeabgabe pro Quadratmeter Heizfläche und Stunde | 3240 W.E. | 3230 W.E. | 3220 W.E. |
| Wärmeabgabe pro Rohr und Stunde | 6780 " | 6760 " | 6740 " |
| Erforderliche Luft pro Rohr und Stunde | 29,83 kg | 27,30 kg | 26,2 kg |
| Volumen beim Eintritt | 25,45 cbm | 23,25 cbm | 22,4 cbm |
| Luftgeschwindigkeit beim Eintritt | 1,35 m/sek | 1,23 m/sek | 1,18 m/sek |
| Volumen beim Austritt | 46,8 cbm | 44,7 cbm | 43,3 cbm |
| Luftgeschwindigkeit beim Austritt | 2,20 m/sek | 2,1 m/sek | 2,02 m/sek |
| Spannung des Wasserdampfes | 266,1 mm Q.S. | 276,6 mm Q.S. | 283,7 mm Q.S. |
| Spannung des Wasserdampfes, korrigiert | 266 " | 281,5 " | 291 " |
| Taupunkt, korrigiert | 73,1° | 74,5° | 75,2° |

fernten Werken Millygrube und Lauchhammer keine große Rolle spielen können, und hat so eine gute Vergleichsmöglichkeit zur Hand. Danach läßt sich also eine Mehrleistung in der Wärmeabgabe der Heizflächen von rund 18 % gegenüber einer älteren Anlage erzielen.

II. Der Trockenvorgang.

A) Die verschiedenen Faktoren.

Da zur Verdampfung von Wasser mindestens die Aufbringung der Verdampfungswärme nötig ist, setzt jeder Trockenvorgang die Möglichkeit voraus, daß der zu trocknende Körper die erforderliche Wärme selbst hergeben oder aus der Umgebung aufnehmen kann. Je mehr Wärme vorhanden ist oder zur Verfügung steht, um so mehr wird Flüssigkeit verdampft; wird die Wärme von außen zugeführt, so wird neben der Verdampfung eine Erwärmung des Trockengutes einhergehen müssen, denn nur die vom Trockengut selbst aufgenommene Wärme kann in Dampf umgewandelt werden.

Die aufgewendete Wärme muß sich in der Verdampfungswärme und im Wärmeinhalt der beteiligten Substanzen wiederfinden. Und es muß, wenn man von den äußeren Verlusten absieht, während eines unendlich kleinen Zeiteilchens dz die allgemeine Gleichung gelten:

$$dQ = r dX + M c_m dt,$$

wenn dQ die aufgewendete Wärmemenge, dX die während der Zeit dz verdampfte Wassermenge, r die Verdampfungswärme, M die Menge der am Trockenprozeß beteiligten Substanzen, c_m ihre durchschnittliche spezifische Wärme und dt die Temperaturänderung ist.

Diese Gleichung gilt nur während des augenblicklichen Zustandes, da sämtliche Werte veränderliche sind. Insbesondere ändern sich auch M und c_m , wenn an der Trocknung Luft beteiligt ist, wie das hier stets vorausgesetzt werden soll, da mit dem Fortschreiten der Trocknung zugleich der Feuchtigkeitsgehalt der Luft zunimmt.

Wird während des Vorganges weder Wärme zu- noch abgeführt, was der Fall ist, wenn die Luft selbst Träger der Wärmezufuhr ist, so geht die obige Gleichung über in:

$$r dX = - M c_m dt,$$

wobei das Minuszeichen die Wärmeabnahme des gesamten Systems anzeigt, mögen auch einzelne Teile, insbesondere auch das Trockengut selbst, eine Wärmezunahme aufweisen.

1. Die Wärmezufuhr.

Bei reiner Lufttrocknung ist die Größe der Wärmezufuhr an einer bestimmten Stelle bei gegebener Wärmeübergangszahl α zwischen Luft und Trockengut bestimmt durch die Gleichung:

$$dQ = \alpha(\vartheta - t)dF \cdot z$$

(vergl. „Hütte“, I, S. 305), wenn ϑ die Temperatur der Luft, t die des Trockengutes, dF die Berührungsfläche im betrachteten Querschnitt und z die Zeit bedeutet.

Verwickelter ist der Vorgang, wenn eine besondere Heizfläche vorhanden ist, durch die dem gesamten System Wärme zugeführt wird.

Bei der Braunkohlentrocknung ist nur noch diese Form der Trocknung üblich; es kommt als Mittel zur Wärmeübertragung lediglich gesättigter Wasserdampf in Frage, der die seiner Spannung entsprechende Temperatur τ besitzt und seine Verdampfungswärme durch die Heizfläche hindurch an Trockengut und Luft abgibt. In seltenen Fällen nur erfolgt eine Wärmezufuhr nebenbei noch dadurch, daß die zur Aufnahme des Wasserdampfes bestimmte Luft vor dem Eintritt in den Trockenapparat erhitzt wird.

Die durch den Heizdampf an die Heizflächen abgegebene Wärme wirkt in verschiedener Weise, zum Teil gegen das Trockengut, zum Teil gegen die Luft.

Während bei Tellertrocknern die Heizflächen gegen Trockengut und Luft annähernd gleich sind, da die obere Fläche der Teller stets vom Trockengut bedeckt ist, während die Unterseite naturgemäß davon freibleibt, ist bei Röhrentrocknern das Verhältnis von der Größe der Füllung in den Rohren abhängig; es ändert sich aber bei manchen Substanzen, wie auch bei Braunkohle, im Verlauf der Trocknung, da mit fortschreitender Trocknung das Volumen des Trockengutes selbst abnimmt, und mit diesem die Berührungsfläche zwischen ihm und der Heizwand.

Für einen beliebigen Querschnitt durch den Trockenapparat gilt die bekannte Wärmeübertragungsformel:

$$Q = kFz(t_1 - t_2)$$

(vergl. „Hütte“, I, S. 306), wobei k die Wärmedurchgangszahl, t_1 und t_2 die Temperaturen zu beiden Seiten der Heizwand darstellen.

Diese Formel hat die gleiche Gültigkeit für das Trockengut wie für die Luft, solange sie sich auf den unendlich kleinen Querschnitt beschränkt, in dem der Vorgang als stationär anzusehen ist.

Bezeichnet man mit k_k und k_l die Wärmedurchgangszahlen für Trockengut und Luft, mit F_k und F_l die zugehörige Heizfläche, mit

τ die Temperatur des Heizdampfes, mit t und ϑ die Temperatur von Trockengut und Luft, so gilt:

$$dQ = dF_k \cdot k_k (\tau - t) z + dF_l \cdot k_l \cdot (\tau - \vartheta) z.$$

Beide Summanden sind vollständig unabhängig voneinander, da es sowohl die Wärmeübergangszahlen als die Querschnitte sind; die Temperaturen t und ϑ sind deshalb auch voneinander verschieden.

Jedoch findet ein Wärmeaustausch zwischen Trockengut und Luft statt, dessen Höhe sich zu $a(\vartheta - t)dF_{kl}$ stellt, wenn F_{kl} die Berührungsfläche zwischen beiden Substanzen und a die Wärmeübergangszahl darstellt.

Zu diesen drei Beziehungen tritt eine Wärmeübermittlung von der auf Luft wirkenden Heizfläche auf das Trockengut durch Strahlung hinzu.

Nach Stefan-Boltzmann (vergl. „Hütte“, I, S. 311) ist die durch die Strahlung zugeführte Wärmemenge:

$$Q = C_1 F z \left[\left(\frac{\Theta}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right], \text{ wobei } C_1 \sim 4 \text{ ist,}$$

bezw. mit den angeführten Bezeichnungen:

$$dQ_s = 4 \cdot dF_{kl} \cdot z \left[\left(\frac{273 + \tau}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t}{100} \right)^4 \right].$$

Die Flächendifferentiale gehen über in das Produkt aus den Begrenzungslinien des Querschnittes und dem Differential der Weglänge dl , was bei Röhrentrocknern zu folgenden Verhältnissen führt:

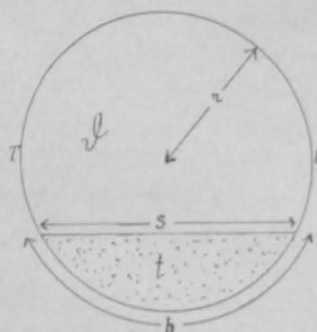


Fig. 4.

Der innere Umfang des Rohres ist $2 \pi r$, der vom Trockengut bedeckte Bogen b und die von der Oberfläche des Trockengutes gebildete Sehne s (Fig. 4).

Dann ist:

$$dF_k = b dl,$$

$$dF_l = (2 \pi r - b) dl,$$

$$dF_{kl} = s dl.$$

Die Hauptgleichung lautet demnach:

$$dQ = \left\{ b k_k (\tau - t) + (2 \pi r - b) k_l (\tau - \vartheta) \right. \\ \left. + 4 s \left[\left(\frac{273 + \tau}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t}{100} \right)^4 \right] \right\} z dl,$$

Ein großer Wert der Berührungsfläche von Luft und Trockengut ist — abgesehen natürlich von den Rücksichten auf die sonstige Flächenverteilung — wünschenswert, weil er die durch Strahlung

übergehende Wärmemenge vergrößert und ferner, weil er den Wärmeaustausch zwischen Trockengut und Luft fördert, da dieser sich in der Größe $s\alpha(\vartheta - t)dl$ abspielt.

Will man sich der obigen Formel bedienen oder sie einer Näherungsrechnung zugrunde legen, so muß vor allem die Größe der Wärmedurchgangszahlen bekannt sein.

Dies ist zunächst nur für Luft der Fall. Der Wärmeübergang auf diese erfolgt nach der bekannten Formel $\alpha = 2 + 10\sqrt{v}$, wenn v die sekundliche Geschwindigkeit der Luft bedeutet. Hieraus berechnet sich die Wärmedurchgangszahl:

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda}}$$

für eine ebene Platte, wenn α_1 den obigen Wert besitzt, α_2 die Wärmeübergangszahl für kondensierenden Wasserdampf ($= 10000$) ist und die Platte bei einer Dicke δ in Metern die Wärmeleitzahl λ besitzt. Für die vorliegenden Verhältnisse bei Röhrentrocknern ist $\delta = 0,003$ m und $\lambda = 40$ (Eisen).

Es ist dann:

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{2 + 10\sqrt{v}} + \frac{1}{10000} + \frac{0,003}{40}}$$

Die beiden letzten Glieder des Nenners können gegenüber dem ersten vernachlässigt werden, bei $v = 2$ m ist k_l unter Berücksichtigung dieser Glieder 16,08, ohne diese 16,13. Bei der Unsicherheit der Koeffizienten selbst kann demnach der Einfluß der Wandstärke vollständig unbeachtet bleiben; das gleiche gilt von der Krümmung der Rohrwand; es darf aber dabei nur die Berührungsfläche mit der Luft, hier also die innere Heizfläche, in die Rechnung eingesetzt werden.

Der Wert der Wärmedurchgangszahl für Kohle wird mit 42 bis 45 angegeben (z. B. Richter und Horn, Die mechanische Aufbereitung der Braunkohle 1910, S. 111) bzw. 47,74 (Franke, Handbuch der Brikettbereitung, Stuttgart 1909). Bei den ersteren Angaben ist nicht gesagt, wie sie ermittelt sind. Die Zahl 47,74 bei Franke stützt sich auf die Berechnungen Randhahns über den Vorgang bei Tellertrocknern. Der Rechnung ist hier die Endtemperatur der Kohle zugrunde gelegt und angenommen, daß diese gleich der der Luft ist. Diese Berechnungsweise ist aber allzu summarisch, und ferner können die unkontrollierbaren Verhältnisse

des Tellertrockners einer auf einige Genauigkeit Anspruch erhebenden Rechnung überhaupt nicht zugrunde gelegt werden.

Einen einheitlichen Betrag wird man ja von vornherein nicht annehmen können, da sich voraussichtlich die Wärmeübergangszahlen bei feuchter Kohle anders stellen werden als bei trockener. Immerhin wird man aber versuchen müssen, eine Durchschnittszahl zu finden, um nicht allzuweit ins einzelne geführt zu werden. Zunächst sei bemerkt, daß auch hier, wie bei Luft, der Einfluß der Rohrstärke und Rohrkrümmung vernachlässigt werden kann. Unter den bei Erörterung des Koeffizienten für Luft angegebenen Verhältnissen würde selbst bei $k_k = 100$ dieser Einfluß mit 1 bis 2 % gegenüber dem wechselnden Koeffizienten verschwinden.

Über die Wärmeübergangszahl von Luft gegen das Trockengut, insbesondere Kohle, bestehen keine Anhaltspunkte. Die Untersuchung ist auch deshalb schwierig, weil bei wasserhaltigen Substanzen stets eine Mischung der Luft mit dem aus dem Trockengut aufsteigenden Dampf stattfindet. Man wird aber wohl annehmen können, daß diese Zahl in ähnlicher Weise von der Geschwindigkeit der Luft abhängt, wie es bei Heizwänden festgestellt wurde.

Sind an sich schon die Bestimmungen der für die Übertragung der Wärme in Betracht kommenden Zahlen keine leichten, so wachsen die Schwierigkeiten ganz ungemein, wenn es sich nicht um einheitliche Stoffe, sondern um physikalische Gemenge handelt.

Die einzelnen Koeffizienten lassen sich dann nicht allein betrachten, sondern sind mit den übrigen, die bei der Wärmeübertragung eine Rolle spielen, vergesellschaftet.

Eine erste Schwierigkeit bietet schon die Bestimmung der Flächen, z. B. der Berührungsfläche. Die einzelnen, der Kugelform sich nähernden Gemengteile berühren nur in kleinen Flächen die Heizwand, und es werden um so mehr dieser Flächen, und um so größer wird die eigentliche Berührungsfläche sein, je kleiner die Körperchen sind. Im übrigen erfolgt die Wärmevermittlung durch Strahlung und die zwischen den einzelnen Teilchen befindliche Luft.

In diesen der Heizfläche dicht anliegenden Teilchen wird zunächst ein Wärmefluß nach dem Innern eintreten. Je größer die Körner sind, um so größer wird das Wärmegefälle in ihnen sein, und um so mehr wird die Durchschnittstemperatur von der äußeren abweichen. Für die Weiterabgabe der Wärme an die weiter entfernt liegenden Teilchen ist nun wieder die Anzahl der Berührungsflächen maßgebend, die bei kleinem Korn größer ist.

Nun kann man alle diese verschiedenen Beziehungen natürlich nicht einzeln aufsuchen und klarstellen und hat deshalb den Begriff der Wärmeleitzahl λ auch auf solche Gemenge ausgedehnt. Man sieht aber aus dem Gesagten sofort, daß die Wärmeleitzahl hier nicht nur von der Substanz, sondern auch von der Korngröße und sonstigen Einflüssen, insbesondere der Entfernung der Körner voneinander, abhängig ist, so daß also von einer einheitlichen Zahl nicht geredet werden kann, sondern nur ein scheinbarer Wert unter bestimmten Verhältnissen vorliegt.

Es sei hier an Nusselts Untersuchungen erinnert (Nusselt, Die Wärmeleitfähigkeit von Isolierstoffen, Berlin 1910). Nusselt hat auch Torf in seine Versuche einbezogen, der bei seiner nahen Verwandtschaft mit Braunkohle Interesse bietet. Die Ergebnisse sind zum Teil in „Hütte“ I, S. 308, mitgeteilt. Es wurden Zahlen zwischen 0,055 und 0,070 ermittelt. Eine genaue Bestimmung war aber deshalb nicht möglich, weil ein Transport von Wasser von der Wärmequelle aus stattfand. Festgestellt wurde aber, daß die Wärmeleitfähigkeit sich mit zunehmendem Trocknungsgrad verschlechtert. Da die Wärmedurchgangszahlen mit der Wärmeleitfähigkeit verquickt sind, wird man für die ersteren ein ähnliches Verhalten annehmen können.

Über die verschiedenen Einflüsse, die auf den Wert der Wärmeübetragungskoeffizienten bestimmend wirken, kann man sich am leichtesten ein Bild machen, wenn man Betrachtungen anstellt, durch welche Versuche man den Wert ermitteln könnte. Und zwar soll zunächst angenommen werden, daß es sich um Bestimmung der Wärmedurchgangszahl aus einer Heizfläche bei einem physikalischen Gemenge handelt, dessen einzelne Körner in sich gleiche Temperatur — also kein Wärmegefälle im Innern — besitzen und nicht wasserhaltig sind, so daß eine Verschiebung des Wassergehaltes nicht eintritt.

Der Stoff werde in einen Kasten geschüttet, dessen Boden die Heizfläche bildet. Die senkrechten Wände bestehen aus wärme- und durchlässigem Material, und über den bis zum Rand gefüllten Kasten werde ein Strom Luft geführt.

Es handelt sich darum, zu bestimmen, welche Wärmemenge während der Versuchszeit von der Heizwand abgegeben wird, und welche Temperatur an der Berührungsstelle mit der Heizfläche herrscht. Die Wärmemenge wird erhalten, wenn der Wärmeinhalt der Substanz und die Temperaturänderung der Luft bei bekanntem Gewicht derselben ermittelt ist.

Es treten nun folgende Beziehungen auf: Durch einen Querschnitt F (Fig. 5) in der Substanz, der parallel der Heizfläche und in einer Entfernung x von ihr liegt, und in dem die Temperatur t herrscht, fließt von unten ein Wärmestrom. Der Wärmedurchgang

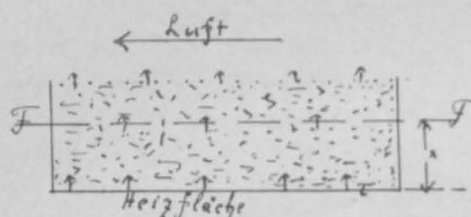


Fig. 5.

durch die Schicht ist proportional der Größe der Fläche, der Wärmeleitzahl λ und der Zeit, umgekehrt proportional der Schichtstärke und proportional der Temperaturdifferenz an den beiden Begrenzungsflächen der Schicht.

Ist die Dicke der Schicht unendlich klein $= dx$, so ist die Temperaturdifferenz dt und im Zeitdifferential dz , währenddessen der Wärmefluß als stationär gelten kann, fließt in die Schicht ein die Wärmemenge:

$$F\lambda \frac{dt}{dx} dz \text{ W.E.}$$

Die Temperaturen der beiden Begrenzungsflächen sind t und $t - dt$, infolgedessen die der benachbarten Schicht $t - dt$ und $t - dt - d(t - dt)$, deren Temperaturdifferenz also $d(t - dt)$; es fließt demnach durch diese Schicht hindurch die Wärmemenge:

$$F\lambda \frac{d(t - dt)}{dx} dz \text{ W.E.}$$

Die Differenz beider Wärmemengen muß zur Temperaturerhöhung der ersten Schicht um dt gedient haben.

Ist γ das spezifische Gewicht und c die spezifische Wärme der Substanz, so ist die aufgenommene Wärmemenge: $Fc\gamma dx dt \text{ W.E.}$

Es besteht demzufolge die Gleichung:

$$F\lambda \frac{dt}{dx} dz - F\lambda \frac{d(t - dt)}{dx} dz = Fc\gamma dx dt$$

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = \frac{c\gamma}{\lambda} \cdot \frac{dt}{dx}$$

$$t = \frac{c\gamma}{\lambda} C \cdot e^{-\frac{c\gamma}{\lambda} x} \cdot e^{\frac{c\gamma}{\lambda} z}$$

Für $z = 0$, $x = 0$ muß sein:

$$t = t_0; \quad \frac{c\gamma}{\lambda} C = t_0.$$

Zu einer Zeit z ist für $x = 0$:

$$\dots t = t_0 e^{\frac{c\gamma}{\lambda} z} = t_1.$$

Dann gilt für andere Werte von x zu derselben Zeit:

$$t = t_1 e^{-\frac{c\gamma}{\lambda}x},$$

und setzt man für x die Werte a und b ein, vergleicht also die Temperaturen in zwei verschiedenen, in der Entfernung $a - b$ voneinander entfernten Schichten, so ist:

$$t_a = t_1 e^{-\frac{c\gamma}{\lambda}a} \quad \text{und} \quad t_b = t_1 e^{-\frac{c\gamma}{\lambda}b}.$$

Der Temperaturunterschied zwischen beiden ist:

$$t_a - t_b = t_1 \left(e^{-\frac{c\gamma}{\lambda}a} - e^{-\frac{c\gamma}{\lambda}b} \right).$$

Er ist also proportional der Temperatur t_1 bzw. den Temperaturen der Schichten selbst. Das Wärmegefälle ist demnach um so größer, je höher die Temperaturen sind.

Die Messung der Temperaturen bei dem beschriebenen Versuch würde am besten durch Thermoelemente erfolgen, die in gewissen Abständen von der Heizfläche eingebaut werden. Man könnte den so festgestellten Temperaturverlauf graphisch ergänzen und die Berührungstemperatur an der Heizwand extrapolieren, man könnte ferner den Wärmezuwachs der Substanz aus dem zu verschiedenen Zeitpunkten gemessenen Wärmegefälle planimetrisch ermitteln, während die Bestimmung der durch die Luft fortgeführten Wärmemenge ja leicht erfolgen könnte.

Anders liegt der Fall, wenn man versuchen wollte, die vom Material aufgenommene Wärmemenge kalorimetrisch zu bestimmen und hieraus mit Hilfe von Gewicht und spezifischer Wärme die Temperatur zu berechnen. Man würde dann erhebliche Fehler begehen, wie sich aus folgendem ergibt:

Der Wärmeinhalt einer Schicht von der Dicke $x = d$ zu einer beliebigen Zeit bestimmt sich zu:

$$Q = F c \gamma t_1 \int_0^d e^{-\frac{c\gamma}{\lambda}x} dx = F c \gamma t_1 \frac{\lambda}{c\gamma} \left(1 - e^{-\frac{c\gamma}{\lambda}d} \right);$$

und die Durchschnittstemperatur:

$$t_m = \frac{Q}{F c \gamma d} = \frac{t_1}{d} \frac{\lambda}{c\gamma} \left(1 - e^{-\frac{c\gamma}{\lambda}d} \right).$$

Angenommen, man hätte zu dem Versuche Braunkohle verwendet, deren spezifisches Gewicht 0,6 und deren spezifische Wärme gleichfalls 0,6 ist, während die Wärmeleitzahl annähernd 0,06 ist,

entsprechend den von Nusselt für Torf ermittelten Werten, und die Temperatur t_1 sei einmal 30° , das andere Mal 80° gewesen.

Man habe verschiedene Schichtstärken bei dem Versuche verwendet und deren Temperatur kalorimetrisch bestimmt. Dann wären folgende Werte erhalten worden:

Bei einer Schichtstärke von:

| | $t_1 = 30^\circ$ | $t_1 = 80^\circ$ |
|----------------|------------------|------------------|
| 1 cm | 29,0, | 77,4, |
| 2 " | 28,2, | 75,1, |
| 3 " | 27,5, | 73,3, |
| 4 " | 26,8, | 71,5, |
| 5 " | 25,9, | 69, |
| 6 " | 25,2, | 67,1, |
| 7 " | 24,5, | 65,2, |
| 8 " | 23,8, | 63,4, |
| 9 " | 23,2, | 61,7, |
| 10 " | 22,6, | 60. |

Der hierdurch begangene Fehler steigt mit zunehmender Schichtstärke beträchtlich und ist absolut am größten bei dem höheren Werte von t_1 . Wollte man nun den so erhaltenen Wert zur Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten benutzen, so würde man erhebliche Fehler begehen. Bei $\tau = 130^\circ$ und $t = 30^\circ$ würde die richtige Temperaturdifferenz 100° sein. Bei Benutzung der Durchschnittstemperatur von 1 cm Schichtstärke würde man sie zu 101° einsetzen und demzufolge den Koeffizienten um 1% zu niedrig bestimmen. Dagegen würden bei $t_1 = 80^\circ$ sich statt 50° nunmehr $52,6^\circ$ ergeben; der Koeffizient würde um $5,2\%$ falsch sein.

Genau so handelt man nun im praktischen Falle, wo die Durchschnittstemperaturen allein von Bedeutung sind und man aus dem Endzustand die Wärmeübertragung zurückrechnet. Man interessiert sich nicht für die wirkliche Wärmedurchgangszahl und bestimmt sie auch nicht, sondern nur den scheinbaren auf die Durchschnittstemperatur bezogenen Wert, woraus sofort zu ersehen ist, daß solche Werte keine allgemein gültigen sind.

Es wird ja nicht der beschriebene Fall in seiner ganzen Schroffheit auftreten, da man bestrebt ist, durch möglichstes Mischen eine gleichmäßige Temperatur herzustellen, man wird aber nie mit Sicherheit sagen können, inwieweit das gelungen ist.

Und hier kommt weiter hinzu, daß auch die Außentemperatur eines Körperchens höher als seine Durchschnittstemperatur ist, und daß hierfür ganz ähnliche Beziehungen wie für die Schicht selbst gelten, nämlich daß die Durchschnittstemperatur um so viel mehr unter der Außentemperatur liegt, je größer das Korn und je höher die Temperatur ist.

Man wird also ganz allgemein bei niedrigeren Temperaturen einen richtigeren und höheren Wert der Wärmedurchgangszahl ermitteln als bei höheren, oder mit anderen Worten: die Wärmeübertragung wird bei niedrigen Temperaturen besser sein als bei höheren, selbst wenn man die geringeren Wärmedifferenzen bei letzteren berücksichtigt hat.

Welch große Bedeutung die Herstellung einer gleichmäßigen Wärmeverteilung durch Mischen besitzt, hat sich bei der Einführung der Wendeleisten in Röhrentrocknern ergeben. Ohne diese erfolgt das Mischen dadurch, daß bei der Drehung der Trommel der Inhalt infolge der Reibung an den Rohrwänden an der entsprechenden Bewegung gehindert wird, so daß sich die Oberfläche schief stellt, bis ein Ausgleich durch Herabrieseln der höchstgelegenen Teile stattfindet. Die Energie des Mischens hängt also ganz vom Reibungswinkel ab, bei sehr glatten Rohren wird der Inhalt des Rohres durch Gleiten an den Rohrwänden in die neue Stellung gelangen. Die Wendeleisten schließen diese Form des Ausgleiches aus und bewirken zugleich, daß die Teilchen ohne Regelmäßigkeit durcheinanderfallen. Ganz wird die durch die Wendeleisten erzielte Mehrleistung von etwa 15 % natürlich nicht dem Mischen zuzuschreiben sein, es wird auch ein großer Teil der Wirkung in der gleichzeitig erfolgenden Vergrößerung der Heizfläche seinen Grund haben.

Stellt man den beschriebenen Versuch mit wasserhaltigem Material an, so wird die Temperaturverteilung eine andere werden.

Dadurch, daß an den heißeren Stellen ein Verdampfen des Wassers und damit eine Wärmeentziehung stattfindet, an den kälteren Stellen aber Niederschlag des Wassers und Wärmezufuhr eintritt, wird ein Ausgleich der Temperaturen geschaffen. Und dies wird um so mehr der Fall sein, je größer der Wassergehalt ist; um so mehr wird sich auch die scheinbare Wärmedurchgangszahl der wirklichen nähern. Die Wärmeaufnahme wird dementsprechend bei dem größten Wassergehalt auch am größten sein.

Die Praxis hat allein an der scheinbaren Wärmedurchgangszahl ein Interesse, und es kommt hier darauf an, diese der wirklichen so weit als möglich zu nähern.

Dafür kommt also folgendes in Betracht:

1. Möglichst niedrige Temperatur, da dann die Durchschnittstemperatur sich am meisten der Temperatur an der Berührungsfläche mit dem Heizmittel nähert.

2. Geringe Schichtdicke bzw. innige Mischung der verschiedenen Teilchen, aus demselben Grund wie 1., am wichtigsten bei höheren Temperaturen.

3. Kleine Korngröße, ebenfalls aus dem Grunde wie 1. und insbesondere weil mit abnehmender Korngröße die Berührungsflächen der einzelnen Teilchen mit der Heizwand und unter sich zunehmen.

4. Große Verdampfungsgeschwindigkeit, infolge deren den heißesten Teilen am meisten Wärme entzogen wird.

Bei der gedachten Versuchsanordnung war vorausgesetzt, daß ein gewisser Gleichgewichtszustand bereits eingetreten ist, wobei von der Zeit im allgemeinen abgesehen werden konnte. Für den Fall, daß die Erwärmung der untersten Schicht sehr schnell vorgenommen wird, muß das Wärmegefälle natürlich noch steiler verlaufen, und ebenso wird dies der Fall sein, wenn an der Berührungsfläche mit Luft eine starke Wärmeentziehung stattfindet. Den Wärmeübergangskoeffizienten von Luft an das zu untersuchende Material selbst könnte man ebenso wie die Wärmedurchgangszahl durch Extrapolation des Temperaturverlaufs bestimmen.

Bei einer Lufttrocknung würde diesem Koeffizienten naturgemäß eine erhebliche Bedeutung innewohnen. Bei der Trocknung mittels dampfgeheizter Flächen spielt er nur eine geringe Rolle, da die Temperaturdifferenz zwischen Luft und Trockengut keine beträchtliche ist, und da immerwährend eine Mischung mit dem entwickelten Dampf eintritt. Der Wärmeaustausch wird am besten vonstatten gehen, wenn das Trockengut noch am meisten wasserhaltig ist. Man wird bestrebt sein, die Berührungsfläche möglichst groß zu halten, um zu vermeiden, daß die Luft mit unnötig hoher Temperatur entweicht.

Wie bereits erwähnt, kann die Gleichsetzung der Wärmeübergangszahl α und der Wärmedurchgangszahl k nur dann erfolgen, wenn die übrigen Glieder der Bestimmungsgleichung vernachlässigt werden können. Dies ist möglich bei der Verwendung gesättigten Wasserdampfes als Heizmittel, dessen Wert $\alpha_2 = 10000$ ist.

Die Wärmeübertragung bei überhitztem Dampf ist gering und entspricht der von Luft.

Man könnte nun annehmen, bei gegebenem Wärmedurchgangskoeffizienten käme der Spannung des gesättigten Heizdampfes lediglich die Wirkung zu, daß durch sie die Temperatur desselben und damit das Wärmegefälle festgelegt wird.

Dem ist aber nicht so, vielmehr tritt mit der Erhöhung von Spannung und Temperatur eine Vergrößerung der Wärmeübertragung ein. Vielleicht walten ähnliche Gründe hierbei ob, wie bei dem besprochenen Unterschied zwischen wirklichem und scheinbarem Koeffizienten, stärkere Konvektion und schnelleres Hinströmen der Wärme an die Wandungen.

In Lorenz, Technische Wärmelehre, München und Berlin 1904, sind von den Gebrüdern Sulzer und von Claasen angestellte Versuche in den Tabellen 29 und 30 mitgeteilt, aus denen man ersieht, daß bis zu einer gewissen Grenze die Wärmeübertragung stärker wächst, als man nach der üblichen Berechnungsweise — Koeffizient und Temperaturdifferenz — erwarten sollte. Und zwar ergibt sich, daß diese Steigerung am höchsten ist und sich bis zu um so höheren Spannungen fortsetzt, je schlechter die Wärmeübertragung an sich ist. In dieser Beziehung ist besonders lehrreich Versuch 8 mit lackiertem Eisenrohr. Hier, wo durch den Lackanstrich eine Erniedrigung der Wärmeleitzahl und Wärmedurchgangszahl geschaffen ist, finden sich ganz außerordentliche Steigerungen, und man kann daraus wohl schließen, daß dies Wachsen ganz besonders da zu beobachten ist, wo niedrige Koeffizienten, wie bei der Mehrzahl der zu trocknenden Substanzen vorliegen, und man wird danach vermuten können, daß ein der von Claasen abgeleiteten Formel:

$$\alpha = 1600 + 40(r - t)$$

ähnliches Verhalten auch hier obwaltet. Es wäre dies also eine weitere Erhöhung, die der scheinbare Wärmedurchgangskoeffizient mit steigender Temperaturdifferenz erfahren würde.

Bei der bekannten schlechten Wärmeübertragung an Luft, die jedenfalls vom Trockengut nicht unterboten wird, muß sich besonders bei Luft die Wirkung der höheren Heizdampfspannung äußern; man wird deshalb annehmen können, daß mit wachsender Dampfspannung die Temperatur der Luft schneller steigt als die des Trockengutes, daß also die Differenzen $\vartheta - t$ hier besonders groß ausfallen werden; wobei natürlich vorausgesetzt ist, daß die Luft im Gleichstrom mit dem Trockengut den Trockner durchströmt.

In ähnlicher Weise wirkt die Geschwindigkeit, mit der der Dampf über die Heizflächen geführt wird, auf die Wärmeübertragung ein. Auch hier wird vermutet, daß diese Steigerung mit der Wurzel der Geschwindigkeit wächst (Lorenz, a. a. O.); doch sind genauere Versuche nicht bekannt. Aus Richter und Horn (a. a. O., S. 100) ist zu entnehmen, daß nach Angaben der Maschinenfabrik Buckau durch Hervorbringen einer Geschwindigkeit von 0,8 bis 0,9 m/sec eine Steigerung der Leistung um 5 % erzielt wird.

Geht man die einzelnen festgestellten Veränderlichkeiten der Wärmeübertragung durch, so erkennt man, daß es schwer sein wird, sie in einer einheitlichen Formel zusammenzufassen. Man wird vielmehr zunächst bestimmte Verhältnisse, wie Korngröße, Apparatype usw., voraussetzen und für diese gesonderte scheinbare Koeffizienten bestimmen müssen, die sich dann wie die wirklichen mit zunehmender Trocknung und abnehmendem Temperaturgefälle ändern werden.

Man kann sonach die Koeffizienten nicht einfach aus dem Endzustand und einer willkürlichen Durchschnittstemperatur ermitteln, sondern muß kleine Intervalle mit nicht zu großen Temperatursprüngen zugrunde legen. Unter dieser Voraussetzung ist dann zwischen zwei Stellen mit den Temperaturen der Kohle t_1 und t_2 und der Luft ϑ_1 und ϑ_2 :

$$Q = F_k k_k z \left(r - \frac{t_1 + t_2}{2} \right) + F_l k_l z \left(r - \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} \right) + F_k l z \left[\left(\frac{273 + r}{100} \right)^4 - \frac{\left(\frac{273 + t_1}{100} \right)^4 + \left(\frac{273 + t_2}{100} \right)^4}{2} \right].$$

Ist der Wert Q bekannt als die Differenz des Wärmehaltes am Anfang und Ende des Intervalles, so kann man hieraus k_k bestimmen. Die übrigen Glieder der Gleichung sind ja mehr oder minder bekannt; für den Wert k_l wird man den bekannten Wert $k_l = 2 + 10\sqrt{v}$ einsetzen, da dessen Veränderlichkeit mit der Temperaturdifferenz auf das Resultat keinen besonderen Einfluß ausübt.

Der ermittelte Koeffizient ist aber nur der scheinbare, da man nicht die Temperatur des Trockengutes unmittelbar an der Berührungsstelle mit der Heizwand und ebenso wenig die Durchschnittstemperatur der einzelnen Körnchen feststellen kann.

2. Die Erwärmung.

Die zugeführte Wärmemenge wird zunächst zur Erwärmung des Trockengutes und der Luft verwendet.

Die spezifische Wärme der Braunkohle war bereits früher zu $0,20 + 0,80 w$ berechnet worden, wenn w der Wassergehalt der Rohkohle ist. Ist nun x die jeweilig verdampfte Wassermenge auf 1 kg Rohkohle, so ist zur Erwärmung des Restes um 1° erforderlich die Wärmemenge $0,20 + 0,80 w - x$, da der Wassergehalt mit der spezifischen Wärme des Wassers eingesetzt war.

Die Menge x ist verdampft und findet sich in der Luft als Wasserdampf wieder, den man als überhitzt ansehen und dem man die spezifische Wärme $0,477$ zuschreiben kann.

Zur Erwärmung von 1 kg Trockengut nebst dem ursprünglich in ihm enthaltenen Wasser um 1° sind demnach erforderlich:

$0,20 + 0,80 w - x + 0,477 x$ W.E. $= 0,20 + 0,80 w - 0,523 x$ W.E.,
und für G kg Trockengut

$$G(0,20 + 0,80 w - 0,523 x) \text{ W.E.}$$

Kommen nun noch L kg Luft hinzu, die trocken die spezifische Wärme $c_p = 0,2375$ besitzen, bzw. wenn die Luft beim Eintritt bereits Wasserdampf mit sich führte, einen entsprechend anderen Wert c_r , so sind insgesamt zur Erwärmung der am Trockenprozeß beteiligten Substanzen um 1° erforderlich $G(0,20 + 0,80 w - 0,523 x) + Lc_p$ W.E. Und nennt man diesen Wert zu Beginn des Trocknens Mc_m , so sind in jedem Stadium zur Erwärmung um 1° erforderlich $Mc_m - 0,523 X$ W.E.

Die Gesamtwärme von 1 kg Dampf ist nach Mollier (Neue Diagramme usw.) $594,7 + 0,477 t - 3p$ W.E., wobei $3p$ ein Korrekturglied ist, das bei den in Frage kommenden Zuständen nur klein ist und hier vernachlässigt werden kann. Es ist dann, wenn man die Flüssigkeitswärme $= t$ setzt, die zur Verdampfung von 1 kg Wasser von t° aufzuwendende Wärmemenge

$$594,7 + 0,477 t - t = 594,7 - 0,523 t \text{ W.E.}$$

Man kann sonach die Verdampfungswärme in einen feststehenden und einen veränderlichen Teil zerlegen. Verbindet man diese Formel mit der obigen, so ist der Wärmeinhalt im beliebigen Stadium der Trocknung

$$(Mc_m - 0,523 X)t + 594,7 X$$

unter der Voraussetzung, daß Trockengut und Luft dieselbe Temperatur besitzen. Ist dies nicht der Fall, so ist der gesamte Wärmeinhalt $(0,20 + 0,80 w - x) Gt + (Lc_r + Gx \cdot 0,477) \vartheta + 594,7 Gx$.

3. Die Verdampfung.

Da es das Ziel bei der Konstruktion eines Trockenapparates ist, mit dem geringsten Aufwand an Anlagekosten und insbesondere

Heizflächen auszukommen, interessiert naturgemäß die Frage am meisten, auf welche Weise man die Verdampfung zu einer möglichst lebhaften gestalten kann.

Die Frage, welche Momente für die Verdampfungsgeschwindigkeit bestimmend sind, ist von Dalton unter Beschränkung auf die Verdampfungsgeschwindigkeit von Wasser im flüssigen Zustand studiert worden. Nach ihm hat Stefan bei seinen Untersuchungen über die Diffusionsgeschwindigkeit auch dies Gebiet berührt und Daltons Ermittlungen bestätigt. Beide Versuche sind in Wüllners Experimentalphysik, Bd. 2, eingehend beschrieben, worauf hier verwiesen sei. Weitere Untersuchungen über die Verdampfungsgeschwindigkeit von wasserhaltigen Massengütern sind dem Verfasser nicht bekannt geworden.

Nach Dalton ist nun die Menge des verdampften Wassers proportional der Größe der Oberfläche und der Zeit und proportional der Differenz zwischen der Spannung S_1 des gesättigten Wasserdampfes bei der Temperatur der Flüssigkeit und der Spannung S_2 des bereits in der Luft vorhandenen Wasserdampfes und umgekehrt proportional dem Drucke, unter dem Wasser und Luft stehen, also auch dem Barometerstand B .

S_1 , S_2 und B seien künftig in Millimeter Quecksilbersäule von 0^0 verstanden. Es ist also $X = \frac{\sigma F(S_1 - S_2)}{B} z$, wobei X die Menge des verdampften Wassers, z die Zeit und σ eine Konstante ist, die angibt, wieviel Kilogramm Wasser auf 1 qm Fläche bei 1 mm Spannungsunterschied und 760 mm Barometerstand in der Stunde verdampft wird.

Während des Trocknens in einem Trockenapparat unter Wärmezufuhr verändern sich die Temperaturen, also auch die Werte S_1 , ebenso S_2 infolge Vermehrung des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes, so daß lediglich für einen bestimmten Punkt gilt:

$$\frac{dX}{dz} = \frac{\sigma F(S_1 - S_2)}{B}.$$

Die Differenz $S_1 - S_2$ stellt gewissermaßen die Spannung dar, die noch zur Aufnahme von Wasserdampf frei ist, und soll deshalb künftighin als „Freie Spannung“ S_d bezeichnet werden. Es ist also:

$$\frac{dX}{dz} = \frac{\sigma F S_d}{B}.$$

Die freie Spannung ist die Differenz der bei der gegebenen Temperatur der Flüssigkeit möglichen Spannung des Wasserdampfes, die man aus Tabellen entnehmen kann, und der wirklich in der Luft vorhandenen Spannung des Wasserdampfes. Deren Berechnung ist bereits früher angegeben worden (S. 9, Z. 9).

$$S_2 = \frac{0,4643 \, d \, B}{289 + 0,4643 \, d}.$$

Ist nun x das pro 1 kg des ursprünglich vorhandenen Rohgutes bereits verdampfte Wasser, G das Gesamtgewicht des Rohgutes am Anfang und L das Gewicht trockener Luft, so ist

$$d = x \frac{G}{L},$$

$$S_2 = \frac{0,4643 \, x \frac{G}{L} B}{289 + 0,4643 \, x \frac{G}{L}}$$

und in die Hauptformel eingesetzt

$$\frac{dX}{dz} = \sigma F \left(\frac{S_1}{B} - \frac{0,4643 \, x \frac{G}{L}}{289 + 0,4643 \, x \frac{G}{L}} \right)$$

wobei der anfangs von der Luft mitgebrachte Wassergehalt besonders berücksichtigt werden muß.

Ist d hygrometrisch bestimmt, so gilt:

$$\frac{dX}{dz} = \sigma F \left(\frac{S_1}{B} - \frac{0,4643 \, d}{289 + 0,4643 \, d} \right).$$

Die Verdampfungsgeschwindigkeit ist demnach von der Temperatur der Luft selbst unabhängig, was ja auch durch die Erfahrung des täglichen Lebens bestätigt wird.

Die Schwankungen des atmosphärischen Druckes sind ziemlich bedeutungslos und können nur bei höheren Werten von S_1 einen Einfluß besitzen. Dagegen wird im Vakuum die Verdampfungsgeschwindigkeit um ein ganz Beträchtliches durch die Druckverminderung erhöht.

Die Versuche Daltons sind bei ruhender Luft vorgenommen worden; die Geschwindigkeit der Verdampfung soll durch höhere Luftgeschwindigkeit gesteigert werden, weil mechanisch Wasserdampf fortgeführt wird. Es ist wahrscheinlich, daß durch höhere Luftgeschwindigkeit eine solche Steigerung hervorgerufen wird, indem

Schichten größerer Sättigung zerstört werden, die an der Oberfläche durch Adhäsion festgehalten sind; bei Flüssigkeiten wird ebenso der Rand der Schale Schichten höherer Sättigung entstehen lassen, wie sie bei den Stefanschen Versuchen verwendet wurden.

Ähnlich wird man bei Gemengen annehmen können, daß durch den Einfluß von Adhäsion und Kapillarität eine Umhüllung der einzelnen Körnchen mit einer Haut von gesättigtem Wasserdampf stattfindet, die bei höherer Luftgeschwindigkeit abgesaugt wird, man wird also auch hier eine hohe Geschwindigkeit der Luft bevorzugen.

Handelt es sich um die Trocknung von wasserhaltigen Substanzen, so wird ein wesentlicher Unterschied auftreten je nach der Art, in der das Wasser sich vorfindet. Der Stoff kann einfach der Träger von Wasser sein, dann wird man ohne weiteres die Gültigkeit des Daltonschen Gesetzes voraussetzen dürfen. Das Wasser kann aber auch als Konstitutionswasser eine Verbindung chemischer Natur eingegangen sein, der Wassergehalt würde dann von der Temperatur selbst abhängen; hier kann man von einer eigentlichen Trocknung nicht mehr sprechen.

Ferner wird man vermuten können, daß bei organischen Substanzen, in denen das Wasser den Zelleninhalt bildet, Abweichungen infolge Kapillarkwirkungen usw. auftreten werden. So zeigt auch die Braunkohle auffallende Eigenschaften. Man kann sie durch das Liegen an freier Luft nicht vollständig abtrocknen, sondern nur (vergl. Gräfe, „Braunkohle“ 1910, S. 172) auf 11 bis 13 % Wassergehalt, während bei Wasser ja bekanntermaßen vollständige Verdunstung möglich ist. Braunkohle ist ferner hygroskopisch, wechselt beim Liegen an der Luft den Feuchtigkeitsgehalt mit dieser und nimmt, wenn man sie künstlich getrocknet hat, aus der Luft lebhaft Wasser auf, bis der oben genannte Prozentsatz wieder erreicht ist. Hierzu kommt, daß man beobachtet zu haben glaubt, die Trocknung schritte nicht in gleicher Weise vor, vielmehr von einem Wassergehalt von 25 % an langsamer.

Insbesondere hat Kosmann (Verhandlungen des IV. Allgemeinen Deutschen Bergmannstages, Halle 1890, S. 103 und 262) die Ansicht vertreten, daß der Wassergehalt unter 25 % Hydratwasser sei. Zur Begründung führt er an, daß nach einer Wasserentziehung über dies Maß hinaus ein Rückführen in den ursprünglichen Zustand nicht mehr möglich sei. Wenn man das auch zugeben muß, so wird man als genügende Erklärung — soweit von Erklärung geredet werden kann — das gleichartige Verhalten lebender Pflanzen anführen können, die im allgemeinen nach einmal erfolgter Trocknung

die Fähigkeit zur Wasseraufnahme infolge Schrumpfung der Zellwände verloren haben.

Um über diese Fragen, die für den Trocknungsvorgang grundlegend sind, eine Klärung herbeizuführen, schien es erforderlich, Versuche mit möglichst leicht zu übersehenden Versuchsbedingungen anzustellen; und zwar schienen solche gegeben, wenn die zu untersuchenden Proben in einem Raum von gleichbleibender Temperatur über Chlorkalzium unter Glas getrocknet werden und wenn das Gewicht der Proben ohne Unterbrechung des Verschlusses in verschiedenen Zeitabständen festgestellt wird.

Die Versuche, über deren Resultate die Aufzeichnung der Beobachtungen (Anhang 2) und deren diagrammatische Darstellung (Fig. 6) unterrichten, sind in einem Kellerraum des Maschinenlaboratoriums der Königl. Technischen Hochschule zu Dresden angestellt worden. Die Gleichmäßigkeit der Temperatur ist aus den Aufzeichnungen ersichtlich.

Als Material der Untersuchung wurde in allen Fällen Rohkohle der Millygrube, Bockwitz, N.-L., verwendet, die zum Teil in verschlossenen Büchsen angeliefert war, zum Teil der zu sonstigen Zwecken gelieferten Kohle entstammte, da es erforderlich schien, ein und dasselbe Material den verschiedenen Beobachtungen zu unterwerfen.

Die Proben wurden, nachdem sie in dem Versuchsraum einige Tage verschlossen aufbewahrt waren, um die dort herrschende Temperatur anzunehmen, bei Versuch 1 und 2 auf Metallblechen ausgebreitet, die aufgebogen und etwas schräg gelegt waren, um durch Ermöglichung einer Luftbewegung das Bilden von Schichten höherer Sättigung zu vermeiden. Die Bleche mit den Proben wurden auf Briefwagen gelegt, von denen die eine neu und geeicht war, auch eine befriedigende Empfindlichkeit aufwies, während eine zweite weniger diese Eigenschaften besaß. Bei Versuch 1 wurde die erstere Wage allein, bei den übrigen Versuchen beide verwendet.

Die Wagen wurden unter ein Akkumulatorglas zusammen mit Chlorkalzium gebracht und die Unterlage mit Glaserkitt abgedichtet.

Nach erfolgtem Verschluß wurde die erste Ablesung vorgenommen, und die Ablesungen wurden wiederholt, ohne das Glas abzuheben. Bei jeder Ablesung wurde die Temperatur im Versuchsraum festgestellt.

Es war die Konstanz der Oberfläche gegeben und ebenso annähernd Konstanz in der Temperatur des Trockengutes und damit in dem Werte S_1 .

Eine absolute Konstanz des Wertes S_2 wird sich allerdings nur dann herstellen lassen, wenn Oberfläche und Menge des Chlorkalziums groß genug sind, alle sich entwickelnden Wasserdämpfe sofort zu binden. Ist dies nicht der Fall, was ja anzunehmen ist, so muß die Dampfspannung sich auch verschieden einstellen, wenn die Verdampfungsgeschwindigkeit des zu untersuchenden Stoffes sich ändert. Nimmt diese ab, so verringert sich auch die vorhandene Dampfspannung und verursacht durch Erhöhung der freien Spannung eine Vergrößerung der Verdampfungsgeschwindigkeit. Man wird diese also im Anfang zu klein, am Ende zu groß ermitteln.

Bei dem ersten Versuch war das Chlorkalzium in einen Trichter geschüttet und bot infolgedessen eine geringe Oberfläche dar; bei den anderen Versuchen wurde dieselbe Menge (etwa 300 g) auf den Boden verstreut, und es ergab sich eine bedeutend schnellere Verdunstung. Wie groß aber in Wirklichkeit die freie Spannung war, konnte nicht festgestellt werden, da kein Hygrometer zur Verfügung stand, das in dem Glas hätte mit untergebracht werden können.

Diese Unkenntnis war bedeutungslos, da es sich lediglich darum handelte, die Veränderlichkeit in der Wasserabgabe festzustellen.

Nach Beendigung des Versuches wurde der verbliebene Wassergehalt ermittelt, indem die Kohle in einem Trockenschrank (Anilinheizung) bei einer Temperatur von 100 bis 105° bis zur Gewichtskonstanz abgetrocknet wurde, was in etwa 2 bis 3 Stunden der Fall war. Aus der so ermittelten Gewichts-differenz wurde der Restwassergehalt und ferner der Wassergehalt beim Beginn des Versuches berechnet.

Versuch 1 sollte dazu dienen, das Verhalten der Kohle festzustellen, wie sie in Wirklichkeit der Trocknung unterworfen wird. Es war eine direkt vom Kohlenboden entnommene Probe und enthielt also auch alle verschiedenen Korngrößen bis etwa 5 mm aufwärts. Da bei diesem Versuch das Chlorkalzium weniger wirksam war, kann ein direkter Vergleich mit den anderen Versuchen nicht vorgenommen werden.

Versuch 2 dient zur Vergleichung zwischen feinkörnigem Material bis zu etwa 2 mm Korngröße und Knorpeln, die von Hand ausgelesen waren und als geringste Dimension etwa 5 mm besaßen. Die Proben entstammten verschiedenen Sendungen, die Stückchen waren bereits etwas angetrocknet. Um die Unterschiede deutlich hervortreten zu lassen, waren die mittleren Korngrößen ausgeschaltet.

Versuch 3 stellt gewissermaßen eine Analogie zu den Stefan-
schen Versuchen dar und soll den Einfluß der Oberfläche und
Schichtstärke klarlegen. Es wurde dieselbe klare Kohle verwendet
wie bei Versuch 2, sie wurde aber nicht ausgestreut, sondern in

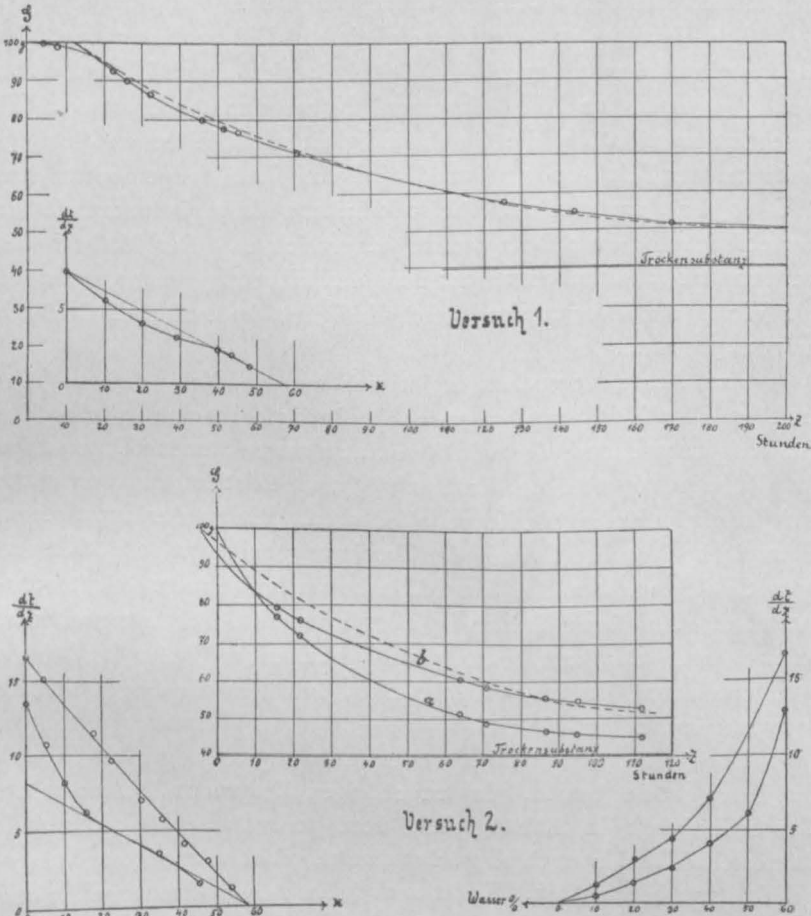


Fig. 6.

Blechkästchen eingefüllt und am Rande glattgestrichen. Das eine
Kästchen war 4 cm hoch, 4 cm breit und 8 cm lang, bot also 32 qcm
Oberfläche; das andere war 8 cm hoch und je 4 cm breit und lang
mit 16 qcm Oberfläche. In beiden war annähernd dasselbe Quantum
Kohle vorhanden.

Die erhaltenen Resultate sind aus den Diagrammen (Fig. 6)
am bequemsten ersichtlich, in denen die Zeit als Abszisse, die je-
weiligen Gewichte als Ordinaten aufgetragen sind.

Wäre die Gewichtsabnahme konstant, was nach den Dalton'schen Untersuchungen bei Wasser wenigstens angenähert der Fall sein müßte, so würde die Gewichtsabnahme nach einer Geraden verlaufen. Hier ist aber sofort erkennbar, daß die Gewichtsabnahme mit fortschreitender Trocknung immer langsamer vor sich geht.

Die Verdampfungsgeschwindigkeit als Differentialquotient der verdampften Mengen nach der Zeit läßt sich durch Konstruktion der Tangenten an die einzelnen Kurvenpunkte ermitteln. Es erscheint zweckmäßig, die Geschwindigkeit nicht in ihrer Abhängigkeit von der Zeit, sondern von den verdampften Mengen bzw. dem Wassergehalt darzustellen. Die so erhaltene Kurve ist unterhalb der verschiedenen Gewichtsdiagramme eingezeichnet. Der Maßstab der verdampften Mengen entspricht dem des Hauptdiagramms, während die Werte der Verdampfungsgeschwindigkeit im 40fachen Maßstab aufgetragen sind.

Aus diesen Versuchen ergibt sich nun deutlich, daß die Abnahme der Verdampfungsgeschwindigkeit eine regelmäßige ist, daß insbesondere der von Kosmann angenommene Unterschied im Wassergehalt über und unter 25 % nicht existiert, denn er müßte sich in einem Knick der Kurve offenbaren. Bis zu der praktisch in Betracht kommenden Grenze der Trocknung bei etwa 10 % Wassergehalt sind grundsätzliche Verschiedenheiten im Verhalten nicht wahrnehmbar. An dieser Grenze ist allerdings die Geschwindigkeit sehr gering, aber das kann nach dem Verhalten an freier Luft nicht wundernehmen. Es ist wahrscheinlich, daß hier die Gegenwirkung hygroskopischer Art eintritt.

Dagegen ersieht man aus Versuch 2, welch großen Einfluß die Korngröße besitzt. Im zugehörigen Diagramm ist rechts die Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom prozentualen Wassergehalt dargestellt. Der Unterschied wächst danach mit abnehmendem Wassergehalt ganz beträchtlich. Es ist auch leicht zu verstehen: im Anfang befindet sich auf den Knorpeln noch eine Schicht Staub und auch an sich ist die Oberfläche des Kornes noch groß; im weiteren Verlauf reduziert sich diese Oberfläche immer mehr, und es kommt die Kapillarwirkung hinzu, die ein Festhalten gesättigten Wasserdampfes im Innern bewirkt. Und weiter wird das Vorschreiten der zur Verdampfung erforderlichen Wärmemenge durch das Wärmegefälle im Inneren des Kornes gehemmt. So darf es denn nicht wundernehmen, wenn der ganze Verlauf hier ein weniger regelmäßiger wird, da keine absolut runden Körper vorliegen, sondern die verschiedensten Formen auftreten.

Dagegen zeigt sich in der Kurve *a* des Versuches 2 eine ziemliche Regelmäßigkeit. Die Verdampfungsgeschwindigkeit verläuft angenähert in der Form einer Geraden, die nach dem Punkte, wo vollkommene Trocknung eingetreten ist, hinläuft; und man kann versuchen, unter Zugrundelegen einer Geraden eine Formel für die Verdampfung zu entwickeln. Da die Ordinate bei dem Punkte $x = 58,4$ Null sein muß, und der Anfangswert bei $x = 0$ auf 1,65 g pro Stunde liegt (unter der Voraussetzung, daß 100 g Substanz verwendet wurden), so erhält man die Gleichung:

$$\frac{dx}{dz} = 1,65 - \frac{1,65x}{58,4}.$$

Setzt man $y = 58,4 - x$, d. h. an Stelle des verdampften Wassers das noch vorhandene, so ist:

$$\frac{dy}{dz} = -\frac{1,65}{58,4} y,$$

$$y = C e^{-\frac{1,65}{58,4} z},$$

$$x = 58,4 - 58,4 e^{-\frac{1,65}{58,4} z}.$$

Für $z = 0$ ist $x = 0$, also $0 = 58,4 - C \cdot 1$; $C = 58,4$.

Rechnet man nach dieser Formel die Kurve nach und trägt die so gewonnene neue Kurve im Diagramm ein, so ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung. In den übrigen Fällen zeigt die gestrichelte Linie den Verlauf der Verdunstung bei mittlerer Verdampfungsgeschwindigkeit und läßt die Abweichungen gut hervortreten.

Bei dem größeren Korn, das auch in Versuch 1 mit vorhanden war, zeigen sich dagegen größere Abweichungen, die am bedeutendsten bei den reinen Knorpeln sind und nicht mehr die Konstruktion einer einheitlichen Kurve zulassen. Für Versuch 1 würde etwa die Form:

$$\frac{dx}{dz} = 0,65 - \frac{0,65x}{59,2}$$

entsprechen; für Versuch 2b:

$$\frac{dx}{dz} = 0,85 - \frac{0,85x}{59,2}.$$

Versuch 1 kann nicht zu Vergleichen dienen, bei Versuch 2b aber erkennt man aus dem Unterschied der Anfangsgeschwindigkeit, daß mit zunehmendem x die Geschwindigkeit bei grobem Korn bedeutend schneller abnehmen muß als bei feinem, wie es auch das

Diagramm lehrt, das die graphisch ermittelten Werte in Abhängigkeit vom Wassergehalt darstellt.

Versuch 3 soll darüber entscheiden, welchen Einfluß die Oberfläche besitzt, und man sollte annehmen, daß sich die verdampften Mengen entsprechend dieser wie 1 : 2 verhalten müßten. Der Versuch zeigt, daß dies nicht der Fall ist, daß die Verdunstung eine lange Zeit hindurch in beiden Gefäßen ziemlich gleichmäßig verläuft, allerdings bedeutend langsamer als bei der flach ausgebreiteten Kohle der ersten Versuche. Es ist diese Erscheinung wohl am besten daraus zu erklären, daß die angetrocknete Kohle das Bestreben hat, wieder Wasser aufzunehmen, und so eine Art Pumpwirkung eintritt. Da beim praktischen Betrieb es ausgeschlossen ist, daß Schichten von derartiger Stärke längere Zeit ohne Bewegung bleiben, war eine weitergehende Verfolgung dieser Unterschiede unnötig; man kann aber daraus schließen, daß in den Grenzen des wirklichen Betriebes die Verdampfungsgeschwindigkeit von der Oberfläche gegen Luft ziemlich unabhängig ist. Insofern kann man also sagen, daß die verdampfte Wassermenge nicht proportional der Oberfläche, sondern der bei Beginn der Trocknung vorhandenen Gewichtsmenge ist.

Die vorgenommenen Versuche zeigten ein so typisches Bild, daß man wohl erwarten kann, bei anderen Temperaturen werde sich ein gleicher Verlauf ergeben, der nur infolge der höheren freien Spannung rascher sein würde. Da aber in höheren Temperaturen die wichtige ungestörte und gleichmäßige Wärmezufuhr sich nur schwer bewerkstelligen läßt, und ferner mangels einer Einrichtung zur Messung der erreichten freien Spannung absolute Werte nicht zu erhalten wären, schien die weitere Ausdehnung dieser Versuche zwecklos. Sie würden auch keine Klärung für die Frage geben, was die Ursache für den Verlauf der Kurven ist.

Versuch 2a ergab die Näherungsformel für die Verdampfungsgeschwindigkeit:

$$\frac{dx}{dz} = a - bx,$$

bezw.

$$\frac{dx}{dz} = \sigma \left(1 - \frac{x}{w} \right),$$

wobei σ ein Koeffizient und w der Wassergehalt im Rohzustand ist.

Es gibt zwei Möglichkeiten zur Erklärung. Die eine ist, daß die Formel der Ausdruck für das allmähliche Vordringen der Wärme in immer tiefere Schichten ist, daß also nicht

eigentlich ein Zusammenhang zwischen x und w , sondern etwa zwischen dem Durchmesser des Kornes und dem noch wasserhaltigen Kern besteht, so daß die Formel lauten könnte:

$$\frac{dx}{dz} = \sigma \frac{y}{r},$$

wenn r der Radius des ganzen Kornes und y der Radius des wasserhaltigen Kerns ist. Die Abweichung von der Kugelform, die bei den größten Körnern auch am größten ist, würde es bewirken, daß die Geschwindigkeit nicht genau dieser Formel entspricht. Eine theoretische Ableitung solcher Zusammenhänge ist zweifellos recht schwierig, da das Wärmegefälle auch verschiedene Spannungswerte S_1 zur Folge hat, und diese eine recht verwickelte Funktion darstellen.

Nimmt man dagegen den Zusammenhang der Verdampfungsgeschwindigkeit mit x und w an, so erhält man ein Analogon zu der Reaktionsgeschwindigkeit, wie sie in der Chemie aufgefaßt wird und auf diesem Grenzgebiet nicht verwunderlich wäre. Die Verdampfungsgeschwindigkeit wäre proportional dem absoluten Wassergehalt, wie auch bei der chemischen Einwirkung die Geschwindigkeit der Vereinigung proportional den vorhandenen, noch ungebundenen Mengen ist.

Für die weitere Behandlung ist es offenbar von großer Bedeutung, welche dieser Erklärungen die richtige ist; da der zweiten ein viel größerer Einfluß auf den Trockenvorgang innewohnen würde, soll sie zunächst dem weiteren zugrunde gelegt werden, es wird sich aber später zeigen, daß die erstere wahrscheinlicher ist.

Es wird also zunächst zu setzen sein (unter Vernachlässigung des Barometerstandes):

$$\frac{dx}{dz} = \sigma \left(1 - \frac{x}{w}\right) S_d, \text{ und}$$

$$\frac{dX}{dz} = \sigma G \left(1 - \frac{x}{w}\right) S_d,$$

wobei G das Gewicht des Rohgutes ist.

4. Trocknung.

Die eingangs aufgestellte Gleichung:

$$dQ = r dX + M c_m dt$$

stellt sich nunmehr genauer folgendermaßen dar:

$$\text{Es ist} \quad dQ = Fk(r - t)dz,$$

wenn man von der weiteren Spezialisierung der Werte F und k absieht und $t = \vartheta$ setzt. Es ist weiter:

$$rdX = rG\sigma \left(1 - \frac{x}{w}\right) S_d dz,$$

$$Mc_m = G(0,20 + 0,80 w - 0,523 x) + Lc_p.$$

Es gilt also:

$$\begin{aligned} Fk(\tau - t) dz &= rG\sigma S_d \left(1 - \frac{x}{w}\right) dz + \\ &+ [G(0,20 + 0,80 w - 0,523 x) + Lc_p] dt, \\ \frac{dt}{dz} &= \frac{Fk(\tau - t) - rG\sigma S_d \left(1 - \frac{x}{w}\right)}{G(0,20 + 0,80 w - 0,523 x) + Lc_p}. \end{aligned}$$

Setzt man S_d wieder $= S_1 - S_2$ und führt den Näherungswert der Spannung $S_1 = 760 \left(\frac{t}{100}\right)^4$ ein, so wird

$$\frac{dt}{dz} = \frac{Fk(\tau - t) - rG\sigma \left(1 - \frac{x}{w}\right) \left[760 \left(\frac{t}{100}\right)^4 - S_2\right]}{G(0,20 + 0,80 w - 0,523 x) + Lc_p}.$$

Aus dieser Gleichung ersieht man, daß sich der Wert $\frac{dt}{dz}$ bei höheren Temperaturen nur langsam ändern kann; einer Zunahme der Temperatur entspricht eine Abnahme des Minuenden und ein Wachsen mit der 4. Potenz im Subtrahenden des Zählers, während sich die übrigen Werte, vor allem S_2 , nicht mit solcher Schnelligkeit ändern. Da ferner der Wert des Nenners, die spezifischen Wärmen der beteiligten Substanzen, bei Braunkohle verhältnismäßig klein ist, so kann man für die Endtemperaturen annähernd $\frac{dt}{dz} = 0$ setzen und erhält so:

$$\begin{aligned} Fk(\tau - t) &= rG\sigma \left(1 - \frac{x}{w}\right) S_d, \\ S_d &= \frac{Fk(\tau - t)}{rG\sigma \left(1 - \frac{x}{w}\right)}. \end{aligned}$$

Hieraus ersieht man weitaus deutlicher, wovon der Wert S_d , der ja vor allem für die Wirtschaftlichkeit des Trocknens ausschlaggebend ist, abhängt. Nimmt man den Trocknungsgrad und damit den Ausdruck $\left(1 - \frac{x}{w}\right)$ als durch den Zweck der Trocknung gefordert an, so ist die freie Spannung am Ende der Trocknung proportional dem Verhältnis von zugeführter Wärme und Gewichtsmenge; sie wird sinken, wenn man in der Zeiteinheit weniger Wärme und dafür längere Zeit zuführt; bei sonst gleichen

Temperaturen t wird sich die freie Spannung wie die Differenz $\tau - t$ verhalten, bei höherer Temperatur des Heizdampfes also wachsen. Dagegen vermindert sie sich, wenn der Wert σ steigt, also bei Verwendung feineren Korns; da die Unterschiede, wie sich bei den Verdunstungsversuchen gezeigt hat, gegen Ende der Trocknung sehr groß werden, je nachdem grobes oder feines Korn getrocknet wird, so erhellt hieraus, daß nicht nur für die beste Wärmeübertragung, sondern auch für schnelle Verdampfung und gute Wirtschaftlichkeit die möglichste Vorbereitung des Materials Bedingung ist.

In dieser Beziehung hat der Tellertrockner zweifellos dadurch einen besonderen Vorteil, daß eine Zwischenzerkleinerung ohne Schwierigkeit und ohne konstruktive Unterbrechung des Apparates vorgenommen werden kann.

Hängt die Geschwindigkeit der Trocknung nun weiter von dem Wassergehalt selbst ab, so ist es von großer Bedeutung, ob das Gut etwas weniger stark getrocknet wird. Der Wert $1 - \frac{x}{w}$ ändert sich um so stärker, je näher er an Null heranrückt. So ist bei 10 % Wassergehalt die Verdampfungsgeschwindigkeit nur halb so groß als bei 15 %, und entsprechend müßte bei gleichen Endtemperaturen auch S_d auf das Doppelte steigen; um nicht allzu geringe und unwirtschaftliche Sättigung zu erhalten, müßte eine erheblich höhere Endtemperatur angestrebt werden.

Beim Beginn der Trocknung sind die Werte von t und S_1 klein, infolgedessen auch die freien Spannungen, während die Wärmezufuhr, als von $(\tau - t)$ bestimmt, sehr groß ist. Hier ist also die Steigerung der Temperatur und die hierzu verwendete Wärmemenge am größten; dagegen wird S_d klein sein, da auch die Verdampfungsgeschwindigkeit am größten ist.

Eine rechnerische Verfolgung aller dieser Beziehungen bietet von vornherein und selbst in der vereinfachten Form wenig Aussicht auf Erfolg. Vergewärtigt man sich noch, wie die verschiedenen Temperaturen t und ϑ , die verschiedenen Koeffizienten, die wieder von den Umständen bedingt sind, weitere Komplikationen ergeben werden, so wird man zu dem Schlusse geführt, daß nur mit Hilfe eines praktischen Versuches, der die Verhältnisse des Betriebes möglichst nachbildet, ein genauerer Einblick geschaffen werden kann.

B) Versuche.

Entsprechend dem besonderen Interesse für Braunkohlentrocknung und im Hinblick auf die vorliegenden Verdunstungsversuche

wurde der Versuch auf Braunkohle beschränkt; und zwar wurde die gleiche Kohle von Millygrube bei Bockwitz, wie sie zu dem Verdunstungsversuch 2 a gedient hatte, auch hier verwendet. Ebenso lag es nahe, die Verhältnisse des Röhrentrockners nachzuahmen, bei dem äußere Verluste nicht auftreten und das Meßresultat beeinflussen können. Es war allerdings nicht möglich, die gleiche Fortbewegungsart durch Drehen des Rohres anzuwenden, da die Kosten

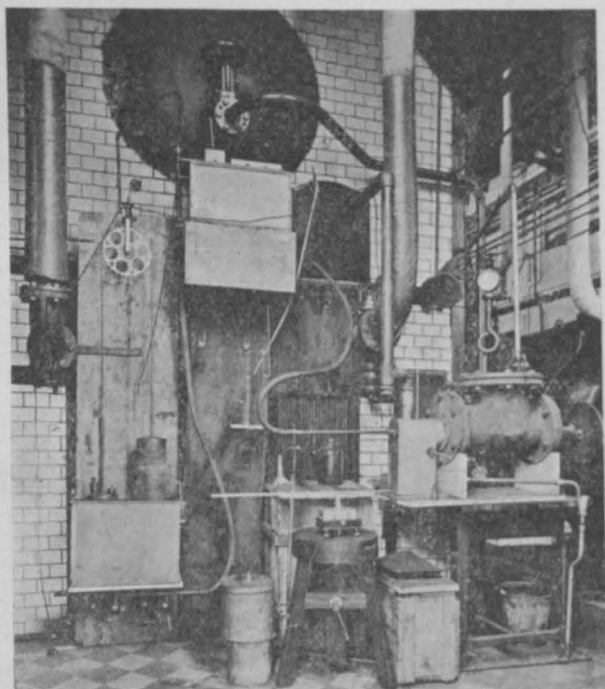


Fig. 7.

dann ganz unverhältnismäßig höhere geworden wären; aber die Dimensionen des Rohres (95 mm lichte Weite und 3 mm Wandstärke) wurden innegehalten.

Der Trockenapparat und die Versuchsanordnung selbst ist photographisch in Fig. 7 u. 8 dargestellt.

Das Trockenrohr ist in ein gußeisernes **L**-Rohr eingebettet. Der Ansatzstutzen steht vertikal nach oben und trägt ein Dampfeinführungsrohr mit Einlaßhahn sowie ein Manometer, das die genaue Ablesung von Zehntelatmosphären gestattet. In den Deckeln des horizontalen eigentlichen Rohres ist das Trockenrohr eingewalzt; die von Dampf bestrichene lichte Länge beträgt 50 cm, während das

Rohr auf jeder Seite etwa 5 cm über die Deckel des Gußstückes herausragt. Das kondensierte Wasser wird durch ein in die untere Wand des **L**-Stückes eingebautes Rohr, das mit genau stellbarem Hahn versehen ist, abgeführt. Die Einstellung auf den jeweils gewünschten Dampfdruck erfolgte durch Betätigung des Ein- und Auslaßhahnes, wobei darauf geachtet wurde, daß dem unteren Hahn lediglich Wasser entströmte, um sicher zu sein, daß der Dampf im

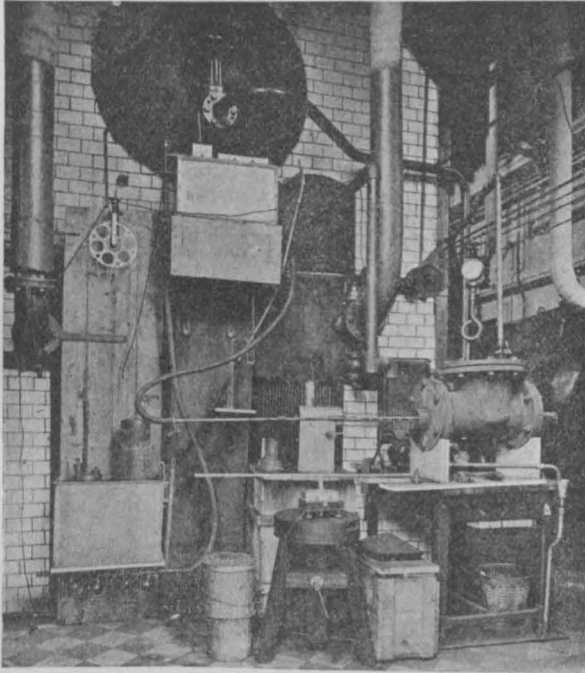


Fig. 8.

Heizmantel ruhend und gesättigt war. Eine Ausdehnung der Versuche auf bewegten Dampf hätte zunächst umständliche Vorkehrungen erfordert, um die Dampfmenge und Geschwindigkeit festzustellen, dann aber wäre man auch nicht sicher gewesen, ob bei größerer Geschwindigkeit auch wirklich gesättigter Dampf zur Verwendung gekommen wäre. Denn der Dampf mußte in dem Einlaßhahn zum Teil von 12 Atm. heruntergedrosselt werden, so daß es bei der Verwendung größerer Mengen Dampfes bei größerer Geschwindigkeit unter Umständen gar nicht zur Sättigung gekommen wäre.

Die Fortbewegung der Kohle erfolgte durch Schaufeln, die an einer rotierenden Welle befestigt waren. Da die wirksame Länge

des Heizrohres nur 50 cm betrug gegenüber der Länge von 7 m beim Schulzapparat, mußte die Bewegung in der Längsrichtung, um gleichfalls eine Durchsetzzeit von 25 Minuten zu erhalten, entsprechend auf etwa 2 cm in der Minute verlangsamt werden. Um dabei aber ein gründliches Durchmischen des Materials zu erzielen, wurden zwei Reihen entgegengesetzt wirkender Schaufeln angebracht, von denen die eine die Kohle 1 cm vorwärts-, die andere 0,66 cm zurückschaufelte, so daß auf eine Umdrehung 0,34 cm Vorwärtsbewegung entfiel. Es konnte sonach in der Minute mit sechs Umdrehungen gearbeitet werden. Die Welle lief in zwei fliegenden Lagern, die das Trockenrohr umfaßten und zwischen ihren Armen genügend Platz für Eintrag und Ausfall der Kohle ließen. Zum Antrieb diente ein mittels Widerständen regulierbarer Elektromotor, der mit Hilfe eines Schnecken-vorgeleges und von Stufenscheiben eine an der Apparatwelle auf der Eintrittseite angebrachte Schnurscheibe in Bewegung setzte. Die Tourenzahl konnte auf diese Weise sehr genau eingestellt werden.

Die Zuführung der Kohle sollte ursprünglich mittels Schiebers aus einem Fülltrichter erfolgen. Bei den in Betracht kommenden kleinen, ablaufenden Mengen traten aber sehr oft Verstopfungen ein, so daß das Beschicken von Hand vorgenommen werden mußte. Es wurde viertelstündlich die Menge von 250 g abgemessen und nach der Uhr annähernd gleichmäßig über diesen Zeitraum verteilt. Eine weitere gleichförmige Verteilung wurde durch die Schaufeln hervor-gebracht. Ebenso ließ sich die ursprüngliche Absicht nicht ausführen, die Kohle in einem Trichter aufzufangen und in eine Glasflasche abzuleiten, weil meist Verstopfungen eintraten und deren Beseitigung zum Öffnen des Apparates und Störung der Luftführung zwang. Es wurde deshalb von einer regelmäßigen Abführung der Kohle abgesehen und dieselbe nur in Bedarfsfällen durch Öffnen eines Korkes abgezogen.

Das Austrittende von Kohle und Luft — es wurde nur in Gleichstrom getrocknet — war mit einem Gehäuse von Zinkblech umgeben, aus dem ein mit Drosselklappe versehenes Rohr den Wrasen abführte. Dieses Rohr wurde mittels Manschette und Dichtung an ein Knierohr und dieses wiederum an ein weiteres Rohr angeschlossen, das mit dem Schornsteinzug der Kessel in Verbindung stand. Dieser Schornsteinzug erwies sich nun für den vorliegenden Zweck als weitaus zu stark; selbst wenn die Drosselklappe vollständig geschlossen war und nur ein haarfeiner Spalt am Umfang offen blieb, wurde das Vielfache der benötigten Luft abgesaugt. Um dem zu begegnen, wurde dem Hauptrohr Nebenluft zugeführt,

indem die untere Öffnung desselben nicht ganz verschlossen war, sondern nur je nach den augenblicklichen Zugverhältnissen mehr oder minder durch eingeschraubte Reduktionsmuttern verengt wurde. Bis auf den Luftabzug war das Gehäuse vollständig verschlossen und ruhte auf einem Brette auf; auf dieses Brett fiel auch die ausfließende Trockenkohle und konnte von hier mittels Öffnen des Stopfens entnommen werden.

Zur Messung der für den Trockenvorgang wichtigen Daten waren folgende Vorkehrungen getroffen:

1. Die Messung des Feuchtigkeitsgehaltes der Luft sollte an verschiedenen Stellen des Rohres mittels des früher beschriebenen Kondensationshygrometers erfolgen. Die Rührwelle wurde deshalb als Rohr ausgebildet und die Wandungen an den Seiten zwischen den Schaufelreihen durchbrochen, wie das sehr deutlich in Fig. 8 zu erkennen ist. In die Welle wurde ein dünnwandiges Messingrohr von 1 cm lichtem Durchmesser von der Austragseite aus bis zur gewünschten Stelle eingeschoben. Es war mittels Korkes an der Außenwand des Gehäuses eingedichtet und beteiligte sich nicht an der Drehung der Welle. Das Prüfrohr war dann mittels Schlauches an das Hygrometer angeschlossen, durch das die Luft auch abgesaugt wurde.

Wegen der guten Wärmeleitfähigkeit des Rohres erfolgte bereits in diesem eine Kondensation des Wrasens, und das gleiche geschah, wenn auch in geringerem Maße, in dem Verbindungsschlauch, der ziemlich lang bemessen werden mußte, um die ungehinderte Bewegung des Prüfrohrs zu ermöglichen, ohne Knicke und Verringerungen des Querschnittes zu erleiden. Um das so entstehende Kondenswasser messen zu können, war das äußere Ende des Prüfrohrs erweitert und trug ein Abflußröhrchen, das in einem Gummischlauch mit Quetschbahn endete. In kürzeren Zeiträumen wurde das Wasser hier abgelassen und in einer Bürette gesammelt.

Zur Einstellung des Prüfrohrs auf die gewünschte Stellung der Mündung im Heizrohr und entsprechend den Durchbrechungen der hohlen Welle war eine hölzerne Latte auf dem Versuchstische angeschraubt, auf die die genaue Einteilung übertragen war, so daß durch Visieren über das Abflußröhrchen die richtige Stellung erzielt werden konnte. Die Durchbrechungen der Welle waren je 4 cm lang und zwischen ihnen befand sich ein massives Stück von 1 cm Länge, infolgedessen der Zwischenraum zwischen je zwei Mitten der Durchbrechungen — Stationen der Messung — 5 cm betrug. Es waren im ganzen 13 solcher Stationen vorhanden, von denen Station II

am Beginn des dampfumspülten Raumes nach der Austragseite hin, Station XI ungefähr am Ende der dampfgeheizten Fläche nach der Einlaufseite hin lag.

Bei den oft zu wiederholenden Messungen des Wasserstandes in der Bürette des Hygrometers erwies es sich als störend, daß beim Ablassen des Wassers infolge der Saugwirkung zugleich das im Filtermaterial befindliche Wasser abließ, und es sodann immer einige Zeit dauerte, ehe die Tropfen wieder regelmäßig fielen. Es wurde deshalb anstatt der Bürette selbst ein U-förmig gebogenes Glasrohr eingesetzt, aus dem dann das Wasser ständig abtropfte. Bei Beginn der Messung wurde sodann einfach eine leere Mensur untergeschoben, so daß das Einstellen des Wasserstandes auf die Nullmarke unterbleiben konnte. Die Messungen wurden im allgemeinen über 25 Doppelhübe, also 0,25 kg Luft, trocken gerechnet, ausgedehnt. Nach jedem fünften Doppelhub wurde die Menge des Kondensates vom Hygrometer und vom Prüfrohr abgelesen und die Messung nur dann als einwandfrei betrachtet, wenn die einzelnen Intervalle keine wesentliche Abweichung untereinander sowie vom Durchschnitt aufwiesen. Es war somit sichergestellt, daß während der etwa viertelstündigen Meßdauer Konstanz herrschte.

2. Die Temperatur der abgesaugten Luft wurde beim Eintritt in das Prüfrohr mittels Thermoelementes gemessen; die Kupfer-Konstantandrähte waren im Inneren des Prüfrohrs durch Glasröhrchen isoliert, sie wurden am verdickten Ende des Prüfrohrs durch einen Gummipropfen ausgeführt und waren weiter durch Gummischläuche geschützt. Während das eine Lötende von der abzusaugenden Luft umspült war, wurde die andere Lötstelle auf der Temperatur des schmelzenden Eises gehalten. Die Messung der Spannung des erzeugten Thermostromes erfolgte mittels eines Galvanometers der Siemens-Schuckertwerke, das 0,01 Millivolt mit Genauigkeit abzulesen gestattete. Die Umrechnung der abgelesenen Spannung in Temperaturgrade wurde mit Hilfe einer Eichkurve vorgenommen, die für das verwendete Material im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule bereits festgestellt war und die Form:

$$\varepsilon = 0,0399 t + 0,000027 t^2 \text{ Millivolt}$$

besaß.

In dem Blechgehäuse am Austragende war ferner ein Quecksilberthermometer angebracht, das vornehmlich zur Kontrolle über die Temperatur des austretenden Wrasens diente, wenn das Thermoelement sich im Innern des Heizrohres befand.

3. Die Temperatur der Kohle wurde beim Ausfall aus dem Heizrohr mittels Quecksilberthermometers ermittelt. Ein dreieckiger, prismatischer Behälter war direkt unterhalb des Ausfalles drehbar so angebracht, daß man entweder die Kohle in ihm auffangen und ihre Temperatur mit dem in der horizontalen Achse des prismatischen Behälters befindlichen Thermometer bestimmen, oder aber beim Auswärtsdrehen des Dreieckes die Kohle an demselben herunterrieseln lassen konnte.

Im Innern des Trockenrohres wurde die Temperatur der Kohle mittels Thermoelements von derselben Beschaffenheit, wie sie das für Messung der Lufttemperatur bestimmte besaß, festgestellt. Nur waren die Drähte isoliert an einem Stabe angebracht, an dessen vorderem Ende die eine Lötstelle überstand und so in das Trockenröhr eingetaucht werden konnte. Zur Vornahme der Messung wurde der Motor stillgesetzt und der Meßstab durch eine Aussparung in der Antriebsscheibe vom Eintrittende der Kohle aus eingeführt. Die gewünschte Stelle im Rohr wurde durch Anhalten eines entsprechend getheilten Meßstabes getroffen. Zunächst diente eine Glasröhre zur Aufnahme der Drähte, es zeigte sich jedoch, daß das Glas einen erheblichen Einfluß auf die Messung ausübte. Die Temperatur stieg zunächst ziemlich langsam, blieb dann eine kurze Zeit konstant, um dann plötzlich erheblich zu steigen. Das Glas übte augenscheinlich eine ziemliche Strahlungswirkung auf die Lötstelle aus, verzögerte deshalb im Anfang die richtige Einstellung, um später, durch die Berührung mit den heißen Wänden des Rohres allzusehr selbst überhitzt, das rapide Ansteigen der Temperatur zu veranlassen. Die Kohlschicht war nach dem Ausfall zu recht dünn, die Messung mußte in einem ziemlich engen Winkel, der durch Heizwand und Rührschaufeln gebildet war, vorgenommen werden, so daß es nicht möglich war, die Berührung, wenigstens des Glasstabes, mit einer der metallenen Flächen zu verhindern. Nach diesen Beobachtungen wurde, wenigstens für die Kontrollversuche, der Glasstab durch einen Holzstab ersetzt, der an den Seiten Nuten trug, in denen die Drähte eingebettet durch Isolierband festgehalten wurden. Dieser Stab war wesentlich leichter und erlaubte ein genaueres Fühlen, die Temperaturen stiegen schneller zu einer gewissen Höhe an, auf der sie dann längere Zeit stehen blieben. Merkwürdigerweise war der Unterschied der Temperaturen in den beiden Serien von Messungen mit Glas- und Holzstab fast ganz gleich, so daß man ihn wohl den Meßinstrumenten zuschreiben darf.

Die Versuche sollten nun dergestalt ausgeführt werden, daß die Luft während eines Versuches an verschiedenen Stellen abgesaugt und ebendort zugleich die Temperatur von Luft und Kohle gemessen wurde. Unter der Voraussetzung, daß die durchströmende Menge Luft, auf trocken berechnet, während des Versuches die gleiche blieb, hätte man ihr Gewicht aus ihrem Feuchtigkeitsgehalt beim Austritt sowie der Menge der getrockneten Kohle und deren Trocknungsgrad bestimmen können.

Innerhalb der engen, durch die Stationen gebildeten Intervalle hätte man dann die Wärmebilanzen aufstellen und unter Zugrundelegung der bekannten Wärmeübergangszahl für Luft und der gleichfalls bekannten Strahlung auch die Wärmeübergangszahl für Kohle und die Verdampfungsgeschwindigkeit ermitteln können. Es wären die Veränderlichkeiten aller dieser Werte zum Vorschein gekommen, insbesondere wenn man die Versuche mit wechselnden Spannungen des Heizdampfes, verschiedenen Mengen von Kohle und Luft sowie verschiedenen Umdrehungszahlen angestellt hätte.

Beim Entwerfen der Apparate war es noch nicht bekannt, welch hohe Sättigung in Wirklichkeit bei den Röhrentrocknern erzielt wird, es lagen nur die wesentlich niedrigeren Randhahnschen Daten (Franke, Handbuch der Brikettbereitung, S. 415) für Teller-trockner vor, wonach zur Verdampfung von 1 kg Wasser rund die zehnfache Menge Luft benötigt wurde. Wenn auch angenommen war, daß in Röhrentrocknern die Sättigung höher sei, so wurden doch die tatsächlich ermittelten Zahlen nicht vermutet. Es ergab sich ferner, daß die Schaufeln an der Rührwelle nur 1 kg Rohgut in der Stunde bewältigten, nicht 1,3 kg, wie es den Leistungen der Schultztrockner entsprochen hätte. So entstand ein Mißverhältnis zwischen dem vom Hygrometer stündlich angesaugten Luftquantum von 2×60 Doppelhüben = 1,2 kg Luft und dem durch den natürlichen Luftzug zu entfernenden. Da auf 1 kg Rohgut rund 0,5 kg Wasser zu verdampfen waren, so genügte bei 74° Sättigung bereits das Hygrometer, man hätte also die weitere Luftmenge entbehren können. Das war aber deshalb nicht möglich, weil ja das Prüfrohr dazu bestimmt war, die Zwischenresultate zu entnehmen, also auch Luft zirkulieren mußte, um den hinter der Absaugöffnung entwickelten Wrasen aufzunehmen. Je weiter das Prüfrohr nach der Eintrittsstelle von Kohle und Luft vorgerückt war, um so weniger Wasser hatte es aufgenommen, um so mehr sonstige Luft war erforderlich. Es war deshalb ziemlich schwierig, auf der einen Seite eine zur Messung genügende Sättigung zu erzielen, auf der anderen Seite

aber auch ein Rückschlagen des Wrasens zu verhindern. Am leichtesten gelang dies, wenn die Messung am Eintrittsende begonnen wurde und hier durch Probieren eine befriedigende Sättigung erzielt war. Allerdings war auch diese Vorsichtsmaßregel nicht genügend, das Luftquantum war so klein, daß es durch die geringsten Zufälligkeiten beeinflusst wurde; atmosphärische Änderungen, Bewegen des Schiebers benachbarter Dampfkessel, Öffnen und Schließen von Türen und besonders Staub und Tropfen kondensierenden Wassers an der Drosselklappe machten sich bemerklich und konnten den Austritt des Wrasens auch am Vorderende des Apparates hervorrufen. So konnte ein Dauerzustand während eines ganzen Versuches nicht erzielt werden, selbst wenn die Hälfte des Tages mit dem Ausprobieren einer geeigneten Stellung der Drosselklappe verbracht war. Ein Umstellen der Drosselklappe wurde zwar vermieden, aber man konnte die Schwankungen der Luftmenge vor allem an der Temperatur der Luft feststellen. Infolgedessen war es nicht möglich, eine Durchrechnung der Wärmebilanzen vom Ende aus vorzunehmen.

Allerdings war die Dauer eines Versuches eine ziemlich lange; um sicher zu sein, daß sowohl das Trockengut sich der mit dem Verschieben des Prüfrohrs veränderten Luftmenge angepaßt habe und im Hygrometer wieder Beharrungszustand eingetreten sei, wurde nach jeder Verstellung eine halbe Stunde gewartet, ehe die neue Messung einsetzte, die auch etwa eine Viertelstunde dauerte.

Ähnliche Gründe verursachten auch bei der Feststellung des Trockengrades Schwierigkeiten. Bei der ursprünglich angebrachten direkten Abführung der Kohle ließen sich kleine Ritzen nicht ganz vermeiden, durch welche Luft eindrang und bei gelegentlichem Luftmangel ein vollständiges Umkehren des Luftstromes bewirkte. Bei Ansammlung der Kohle trat starke Nachverdampfung ein, so daß auch hier zuverlässige Trockenproben nicht zu erhalten waren; die Nachverdampfung machte sich bis in das Heizrohr hinein bemerkbar; Stationen I und II wiesen meist abnorm hohe Sättigungen auf. Auch nach guter Abdichtung der Unterseite des Blechgehäuses blieb die Nachverdampfung nicht aus; es schien, als ob in den verhältnismäßig weiten Wrasenabzugrohren eine doppelte Luftbewegung stattfand, außer der normalen eine entgegengesetzte abfallende, die zur Nachverdampfung beitrug. Um diese Schädlichkeiten möglichst zu verhindern, wurde schließlich gegen Ende des Versuches, wenn das Prüfrohr bei Station I angekommen war, die Kohle im dreieckigen Behälter angesammelt, dann die am Boden des Gehäuses liegende Kohle unbenutzt abgelassen, und schließlich durch Umkippen des

Dreiecks die dort befindliche Kohle besonders aufgefangen und getrocknet. Aus verschiedenen, nicht in der Sache liegenden Gründen konnte eine derartige Bestimmung nur bei dem Hauptversuche mit 3 Atm. abs. Heizdampfspannung stattfinden.

Nach mannigfachen Vorversuchen fand schließlich je eine Serie Haupt- und Kontrollversuche statt, deren Resultate in Anhang 3 niedergelegt sind.

Bei beiden wurde in der Stunde 1 kg Rohkohle zugeführt und machte die Welle 5 Umdrehungen in der Minute.

Die Hauptversuche erstreckten sich:

| | | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|--|
| Montag, den 13. Dezember 1910, auf 3,5 Atm. abs. Dampfspannung, | | | | | | |
| Dienstag, „ 14. „ „ „ 3,0 „ „ „ | | | | | | |
| Mittwoch, „ 15. „ „ „ 2,5 „ „ „ | | | | | | |

während Donnerstag, den 16. Dezember 1910, die Kontrollversuche derart vorgenommen wurden, daß je zwei Messungen mit 3,5, 3,0, 2,5 und 2,0 Atm. erfolgten, ohne daß auf die Stellung der Drosselklappe besonderes Gewicht gelegt wurde; bei 2,5 Atm. wurde absichtlich zwischen beiden Messungen eine Verstellung der Klappe vorgenommen.

Die wichtigsten Resultate dieser Messungen sind in Anhang 3 zusammengestellt. Um eine leichtere Übersichtlichkeit zu erhalten, ist die graphische Darstellung der Ergebnisse in Fig. 9 vorgenommen.

Es sind zunächst die Temperaturen der Kohle als Abszissen und die der Sättigung entsprechenden Wassergehalte auf 1 kg trockene Luft (d) als Ordinaten aufgetragen. Hierdurch entstand eine Kurve, die für 760 mm Barometerstand den Verlauf des Wassergehaltes auf 1 kg Luft darstellt, wenn die Luft stets gesättigt ist. Durch Ziehen von Parallelen zur Abszissenachse wurde ein Netz gebildet, das für den angegebenen Barometerstand ein sofortiges Eintragen gemessener d -Werte ermöglichte, wenn entweder der zugehörige Taupunkt oder der absolute Wert von d bekannt war.

Man könnte dementsprechend weiter ein ähnliches Netzsystem für die Werte von J entwerfen und durch Einpunktieren entsprechend den Werten von d auch die für J finden. Doch ist dies unterblieben, da die Tabellen ein ebenso bequemes Arbeiten zulassen.

Dagegen ist in ähnlicher Weise ein weiteres Diagramm für die Spannungszahlen entworfen (Fig. 10), das durch die Werte S_1 nach den Regnaultschen Zahlen begrenzt wird, während der Wert S_2 auf der Ordinate, welche der Kohlentemperatur entspricht,

entsprechend den Meßresultaten eingetragen werden kann. Die Differenz ergibt dann die freie Spannung.

Die Werte d sind vom Barometerstand unabhängig, wenn sie lediglich zur Vergleichung untereinander dienen und bei annähernd gleichem Barometerstand ermittelt wurden.

Dagegen ist es für die Kenntnis der freien Spannung nötig, die Barometerkorrektur vorzunehmen und die wahren Taupunkte einzusetzen, wie es aus I A. 9 (S. 9) hervorgeht.

Um einen besseren Anhalt zu Vergleichen zu haben, sind im t - d -Diagramm (Fig. 9) die Werte von d für 50, 100 und 150 mm freie Spannung bei 760 mm Barometerstand eingetragen.

Die Resultate der Messungen sind in diese Diagramme eingezeichnet und zu Kurven ergänzt. Die einfach gestrichelten Kurven entsprechen dem Hauptversuch, die strichpunktierten Kurven dem Kontrollversuch.

Alle die so erhaltenen Kurven für den Trocknungsvorgang zeigen eine Übereinstimmung darin, daß sie ihren Ausgangspunkt ungefähr von dem — in den Diagrammen nicht mehr enthaltenen — Nullpunkt nehmen und sich mit vorschreitender Temperatur immer weiter von der Sättigungslinie und auch voneinander entfernen, dergestalt, daß bei denselben Temperaturen der Kohle der Wassergehalt in der Gewichtseinheit Luft immer kleiner, die freie Spannung dagegen immer höher wird, je höher die Spannung und Temperatur des Heizdampfes und je größer damit die Wärmeübertragung wird.

Beide Kurvenscharen stimmen im allgemeinen überein, nur sind die des Kontrollversuches um etwas nach höheren Temperaturen hin ziemlich gleichmäßig verschoben, was bereits früher als Folge der verschiedenen Temperaturmessung gedeutet wurde.

Im einzelnen finden sich ja größere Abweichungen vom gleichmäßigen Verlauf; aber das kann nicht überraschen, da eine Fehlmessung der Temperatur um 1° bereits das Aussehen sehr beeinträchtigt, und da die Schwankungen der Luftmengen sich nicht beseitigen ließen.

Im allgemeinen liefern so die Versuche eine Bestätigung dafür, daß die freie Spannung um so höher wird, je größer unter sonst gleichbleibenden Umständen die Wärmeübertragung ist. Vergleicht man weiter die erhaltenen Zahlen mit den bei Röhrentrocknern festgestellten, so ersieht man, daß bei den Versuchen die Wärmeübertragung viel schneller vor sich gegangen sein muß. Dies ist auch der Fall gewesen, denn es sind nur 1 kg Trockengut stündlich durch

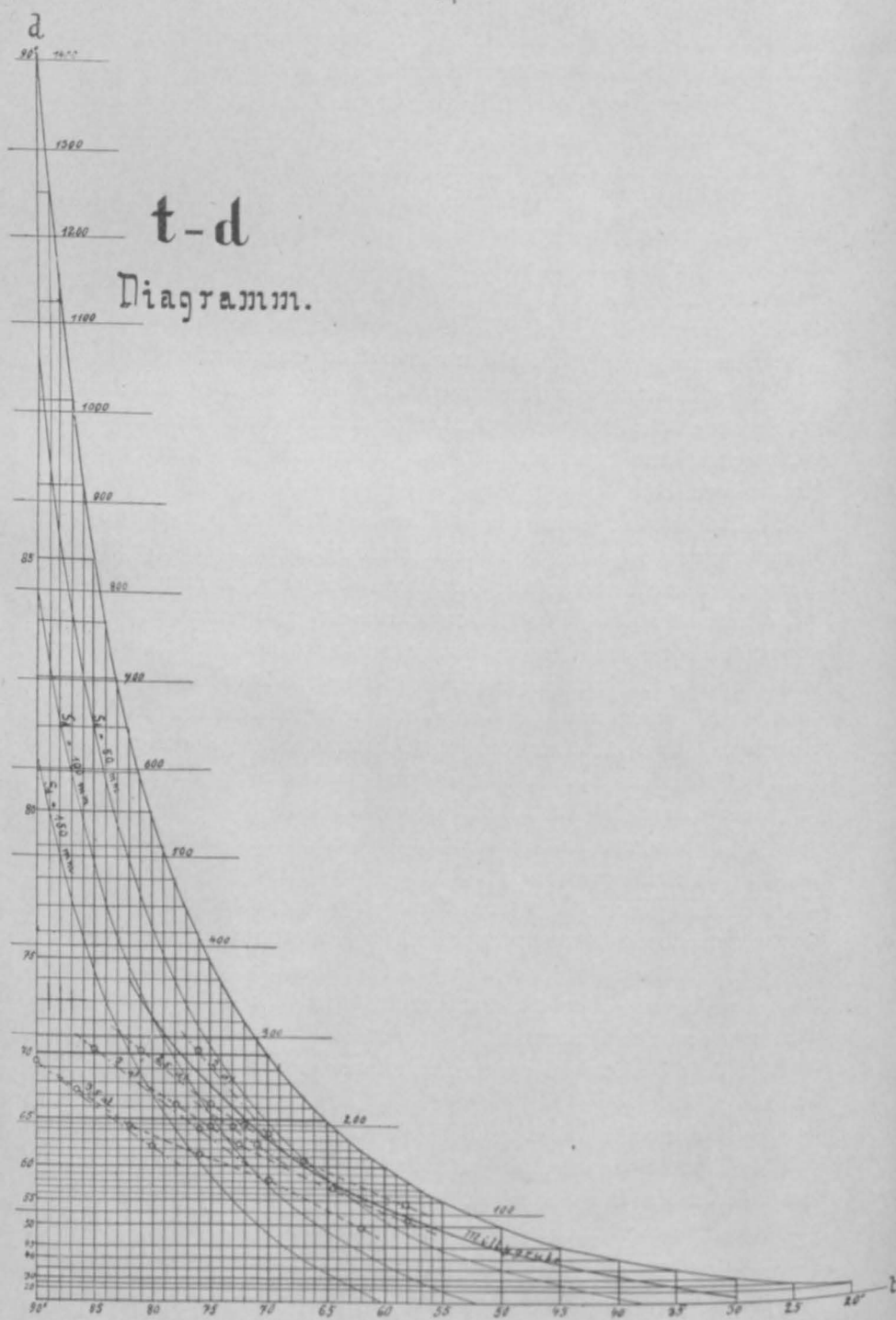


Fig. 9.

den Apparat gewandert gegenüber 1,3 kg, die dem Schultrockner entsprochen haben würden; es ist ferner durch die Schaufeln das Material breitgestrichen worden und hat so eine größere Heizfläche

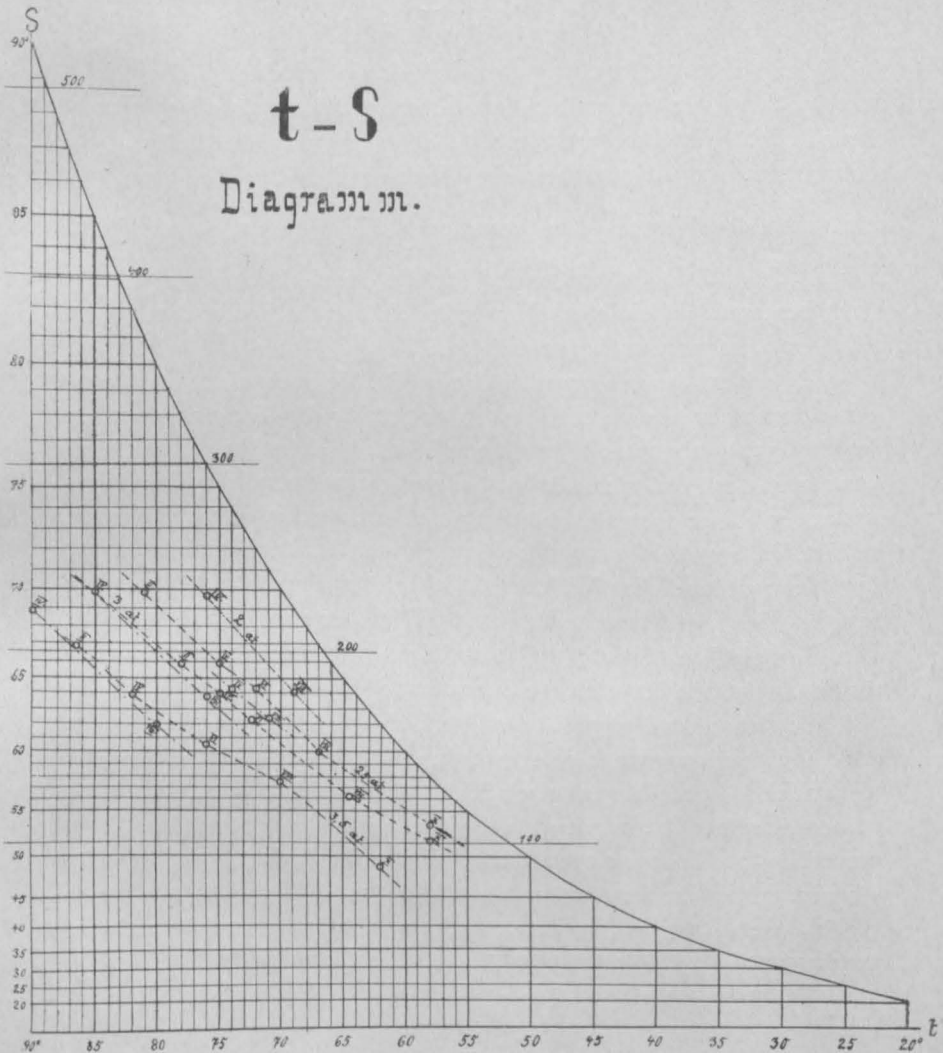


Fig. 10.

gedeckt, als wenn es lediglich infolge der Reibung an den Heizwänden mitgenommen wäre.

Unter der Voraussetzung, daß die entwickelten Formeln richtig sind, muß nach früherem für jeden einzelnen Punkt der Kurven gelten:

$$S_d = \frac{Fk(t - t) - [G(0,20 + 0,80 w - 0,523 x) + Lc_p] \frac{dt}{dz}}{rG\sigma \left(1 - \frac{x}{w}\right)}$$

Diese Nachprüfung ist aber bei den Versuchen selbst nicht durchzuführen; es ließen sich die Flächen nicht genau bestimmen, ebenso nicht der Trocknungsgrad; da ferner auch die Luftmengen schwankten, war kein einheitliches Fortschreiten der Temperaturen und damit der Werte $\frac{dt}{dz}$ zu erwarten. Die so ermittelten Zahlen, insbesondere für k , hätten weiter für die Praxis keinen besonderen Wert besessen, da sie sich eben lediglich auf die Fortbewegungsart des Versuchsapparates bezogen hätten.

Es schien deshalb zweckmäßiger, die Versuchswerte nur insofern zu benutzen, als sie einen guten Anhalt für das Vorwärtsschreiten der Sättigung abgeben. Man konnte zwar schon ohne diese Versuche erwarten, daß sich alle Veränderungen während des Trocknens in stetiger Weise abspielen würden; die Verdunstungsversuche hatten gelehrt, daß auch hier, wo noch am ehesten bei der Verschiedenheit der Korngrößen die Wahrscheinlichkeit sprunghafter Änderung bestand, Stetigkeit vorhanden war. Die Versuche haben aber den Beweis geliefert, daß das Zusammenwirken der Faktoren auch wieder stetige Resultate ergibt.

So ist denn lediglich der Verlauf der Sättigungskurven im t - d -Diagramme zugrunde gelegt worden, während die Werte selbst den Versuchen von Millygrube (S. 42) entstammen. Und zwar sind gerade diese benutzt worden, da die dortige Kohle den Verdunstungsversuchen zugrunde gelegen hatte, und insbesondere, weil die Bestimmung der Endtemperatur der Kohle auf Millygrube am zuverlässigsten erschien. Es wurde als Anfangszustand angenommen:

| | |
|---------------------------|----------|
| Temperatur der Kohle | 10 °, |
| " " Luft | 30 °, |
| Wassergehalt " " | d 7 g, |
| " " Kohle | 57 %, |

als Endzustand:

| | |
|---------------------------|--------|
| Temperatur der Kohle | 82 °, |
| " " Luft | 100 °, |
| Wassergehalt " " | 360 g, |
| " " Kohle | 14 %. |

Dementsprechend ist im Diagramm (Fig. 9) die Kurve der d -Werte möglichst stetig im Verhältnis zur Sättigungskurve eingezeichnet worden.

Da stündlich 15,9 kg Rohkohle und 22,9 kg Luft das Rohr passierten, läßt sich für jeden einzelnen Punkt leicht bestimmen, wie viel Wasser absolut aufgenommen ist und in welchem Zustande sich die Kohle befindet. Die Temperatur der Luft ist damit allerdings noch nicht gegeben; sie läßt sich aber nach zunächst erfolgter probe- weiser Durchrechnung einigermaßen genau einschätzen; unrichtige Annahmen haben ferner nur einen verschwindend geringen Einfluß auf das Gesamtergebn und fallen bei der sonstigen Unbestimmtheit überhaupt nicht ins Gewicht.

Denkt man sich die Rohrlänge in lauter einzelne Teilstückchen $l_1, l_2, \dots l_n$ zerlegt, die nicht gleiche Länge besitzen, sondern dadurch gekennzeichnet sind, daß an ihren Endpunkten bestimmte Temperaturgrade in der Kohle herrschen, und stellt man für diese Endpunkte die Wärmebilanzen auf, so gibt die Differenz beider die Wärmemenge $Q_1, Q_2, \dots Q_n$ an, die auf den Strecken l_n stündlich zugeführt wurde.

Kennt man weiter die Koeffizienten usw. der Wärmeübertragung und die sonstigen Verhältnisse, so kann man den Temperaturverlauf über die einzelnen Teilstückchen und über die ganze Rohrlänge feststellen und graphisch auftragen, sowie durch Konstruktion der Tangenten den Wert $\frac{dt}{dz}$ ermitteln.

Man kann aber auch den Wert k_k selbst in dieser Weise bestimmen, wenn man nur bestimmte Voraussetzungen über die Form desselben macht; und zwar kämen hierfür zweierlei in Betracht, ein Durchschnittswert $k_k = \text{Konst.}$ und ein den Claasenschen Versuchen entsprechender $k_k = k[100 + 3(r - t)]$. Da nach Nusselts Versuchen die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Trocknung abnimmt, und dies praktisch mit den höchsten Temperaturen des Trockengutes zusammenfällt, so wird man ziemlich sicher sein, daß der nach dem Claasenschen Vorgang berechnete Wert eher dem Einfluß des Wärmegefälles zu wenig Rechnung trägt als zu viel.

Nimmt man an, daß die durch Strahlung und Luft übertragene Wärmemenge bekannt sei, indem man sie nach den bekannten Formeln einsetzt, so gilt für die in der Stunde übertragene Wärmemenge:

$$Q_n = l_n b k_k (r - t) + l_n \frac{Q_l}{l_n} + l_n \frac{Q_s}{l_n};$$

bezw.

$$Q_n = l_n b k [100 + 3(x - t)][x - t] + l_n \frac{Q_l}{l_n} + l_n \frac{Q_s}{l_n}$$

$$l_n = \frac{Q_n}{b k_k (x - t) + \frac{Q_l}{l_n} + \frac{Q_s}{l_n}};$$

bezw.

$$l_n = \frac{Q_n}{b k [100 + 3(x - t)][x - t] + \frac{Q_l}{l_n} + \frac{Q_s}{l_n}};$$

wenn Q_l die durch Luft und Q_s die durch Strahlung übermittelte Wärmemenge ist. Es ist ferner bekannt, daß $l_1 + l_2 + \dots + l_n = 7$ m die Rohrlänge sein muß, und es ergibt sich so die Gleichung:

$$7 = \sum \frac{Q_n}{b k_k (x - t) + \frac{Q_l}{l_n} + \frac{Q_s}{l_n}};$$

bezw.

$$7 = \sum \frac{Q_n}{b k [100 + 3(x - t)][x - t] + \frac{Q_l}{l_n} + \frac{Q_s}{l_n}};$$

aus der man durch Probieren den Wert k_k ermitteln kann.

Im einzelnen stellt sich die Berechnung folgendermaßen dar:

Der Wärmehalt der Luft ist aus der Tabelle Anhang 1 leicht auszurechnen. Der Wärmehalt der Kohle wird bestimmt durch das augenblickliche Gewicht, die spezifische Wärme in diesem Punkt und die Temperatur. Dies kann man aber einfacher erhalten, wenn man das spezifische Gewicht auf den Anfangszustand bezieht. Hier war es $0,20(1 - w) + w$; ist von dem ursprünglichen Gewicht von 1 kg Rohgut x kg Wasser verdampft, so sind zur Erwärmung der nunmehrigen Gewichtsmenge $(1 - x)$ kg nur $0,20(1 - w) + w - x$ W.E. erforderlich oder $0,20 + 0,80 w - x$ W.E.; zur Erwärmung der gesamten Kohlenmenge um 1° ist somit in jedem Punkt nötig:

$$G(0,20 + 0,80 w - x) \text{ W.E.},$$

wobei G das Gewicht der Rohkohle ist.

Der Wärmehalt der Kohle ist deshalb an jedem Punkt:

$$G(0,20 + 0,80 w - x)t \text{ W.E.}$$

Die Heizflächen berechnen sich folgendermaßen:

Die Gesamtheizfläche ist $0,095 \pi l_n = 0,298 l_n$; hiervon entfällt auf Kohle der Bogen b und die Fläche $b l_n$, auf Luft $(0,298 - b) l_n$. Der Wert b ist variabel und betrug am Anfang des Rohres 0,103 m, am Ende bei $x = 0,51$ 0,086 m. Da die Differenz die Folge der

mit zunehmender Trocknung eintretenden Volumenverminderung ist, so kann sie ohne allzu großen Fehler dem Werte x proportional gesetzt werden, so daß $b = 0,103 - 0,017 \frac{x}{0,51}$ wird.

Die für die Strahlung maßgebende Sehnenlänge s ändert sich nur unwesentlich und wurde konstant $= 0,08$ m in die Rechnung eingestellt; für die gesamte, in dem Teilstück durch Strahlung abgegebene Wärmemenge Q_s gilt demnach:

$$\frac{Q_s}{l_n} = 4 \cdot 0,08 \left[\left(\frac{273 + t}{100} \right)^4 - \frac{\left(\frac{273 + t_a}{100} \right)^4 + \left(\frac{273 + t_e}{100} \right)^4}{2} \right],$$

wobei t_a die Temperatur der Kohle am Anfang, t_e am Ende des Teilstückes ist. Die durch Luft abgegebene Wärmemenge Q_l ist bestimmt durch den Wert:

$$\frac{Q_l}{l_n} = (0,298 - b)(2 + 10\sqrt{v})(t - \vartheta),$$

wobei v die Geschwindigkeit der Luft ist. Die Geschwindigkeit war beim Eintritt zu 1 m/sec, beim Austritt zu 1,7 m/sec berechnet worden. Die Zunahme ist, da sie auf das Gesamtergebn keinen besonderen Einfluß ausübt, über die Rohrlänge verteilt worden.

Die Temperaturgrenzen der einzelnen Teilstücke sind verschieden bemessen, am Beginn größer, am Ende kleiner; zwischen Anfangs- und Endpunkt der jeweiligen Grenzen wurde geradliniger Verlauf der Temperaturen angenommen und deshalb der Wert $\frac{t_a + t_e}{2}$ als Durchschnittswert eingeführt. Die Grenzen sind so eng gewählt, daß von einer Korrektur, entsprechend „Hütte“, I, S. 309, abgesehen werden konnte.

Die einzelnen zur Berechnung dienenden Daten sind in der Tabelle Seite 90 aufgeführt. Es kommt schließlich zu folgenden Schlußgleichungen:

$$\begin{aligned} 7 = & \frac{167}{13,2 k + 258 + 67} + \frac{167}{12,1 k + 280 + 63} + \frac{442}{10,6 k + 235 + 59} \\ & + \frac{530}{9,9 k + 227 + 55} + \frac{310}{9,0 k + 201 + 52} + \frac{421}{8,4 k + 200 + 50} \\ & + \frac{504}{7,8 k + 188 + 49} + \frac{693}{7,1 k + 179 + 45} + \frac{812}{6,8 k + 167 + 42} \\ & + \frac{1056}{5,9 k + 147 + 40} + \frac{540}{5,4 k + 141 + 36}; \quad k_k = 79. \end{aligned}$$

| t | θ | d | x | Wärmeinhalt | | | Differenz | b Mittel | $x - t$ Mittel | b ($x - t$) | $\frac{1}{2} \frac{1}{10}$ | $x - \theta$ Mittel | $\frac{Q_1}{t}$ | $\frac{Q_2}{t}$ |
|-----|----------|-----|-------|-------------|-----------------------|-------|-----------|---------------|-------------------|--------------------|----------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|
| | | | | der Luft | des Trocken- gutes | Summa | | | | | | | | |
| 10 | 30 | 7 | 0 | 256 | 104 | 360 | 167 | 0,103 | 128 | 13,2 | 12,0 | 110 | 258 | 67 |
| 20 | 35 | 9 | 0,003 | 321 | 206 | 527 | 167 | 0,103 | 118 | 12,1 | 12,5 | 105 | 250 | 63 |
| 30 | 41 | 12 | 0,007 | 391 | 303 | 694 | 442 | 0,102 | 108 | 10,6 | 13,0 | 97 | 235 | 59 |
| 40 | 52 | 30 | 0,033 | 740 | 396 | 1136 | 530 | 0,101 | 98 | 9,9 | 13,0 | 86 | 221 | 55 |
| 50 | 62 | 60 | 0,076 | 1200 | 465 | 1665 | 310 | 0,100 | 90 | 9,0 | 13,5 | 78 | 209 | 52 |
| 55 | 68 | 81 | 0,107 | 1540 | 435 | 1975 | 421 | 0,099 | 85 | 8,4 | 14,0 | 72 | 200 | 50 |
| 60 | 74 | 105 | 0,141 | 1910 | 486 | 2396 | 504 | 0,097 | 80 | 7,8 | 14,0 | 67 | 188 | 49 |
| 65 | 79 | 137 | 0,188 | 2420 | 480 | 2900 | 693 | 0,095 | 75 | 7,1 | 14,5 | 61 | 179 | 45 |
| 70 | 84 | 184 | 0,255 | 3145 | 448 | 3593 | 812 | 0,093 | 70 | 6,5 | 14,5 | 56 | 167 | 42 |
| 75 | 91 | 241 | 0,338 | 4015 | 390 | 4405 | 1056 | 0,090 | 65 | 5,9 | 14,5 | 49 | 147 | 40 |
| 80 | 97 | 320 | 0,452 | 5205 | 256 | 5461 | 540 | 0,087 | 62 | 5,4 | 15,0 | 45 | 141 | 36 |
| 82 | 100 | 360 | 0,510 | 5810 | 189 | 6001 | | | | | | | | |

Wenn man den Faktor $\frac{100 + 3(x - t)}{100}$ einführt, so lautet die Gleichung:

$$\begin{aligned}
 7 = & \frac{167}{4,84 \cdot 13,2 k + 258 + 67} + \frac{167}{4,54 \cdot 12,1 k + 280 + 63} \\
 & + \frac{442}{4,24 \cdot 10,6 k + 235 + 59} + \frac{530}{3,94 \cdot 9,9 k + 221 + 55} \\
 & + \frac{310}{3,70 \cdot 9,0 k + 209 + 52} + \frac{421}{3,55 \cdot 8,4 k + 200 + 50} \\
 & + \frac{504}{3,40 \cdot 7,8 k + 188 + 49} + \frac{693}{3,25 \cdot 7,1 k + 179 + 45} \\
 & + \frac{812}{3,10 \cdot 6,5 k + 167 + 42} + \frac{1056}{2,95 \cdot 5,9 k + 147 + 40} \\
 & + \frac{540}{2,82 \cdot 5,4 k + 141 + 36};
 \end{aligned}$$

$$k_k = 24 \{ 1 + 0,05(x - t) \} = 0,72(33 + x - t).$$

Es wäre nun zu prüfen, inwiefern die so gewonnenen Werte Anspruch auf Zuverlässigkeit machen können.

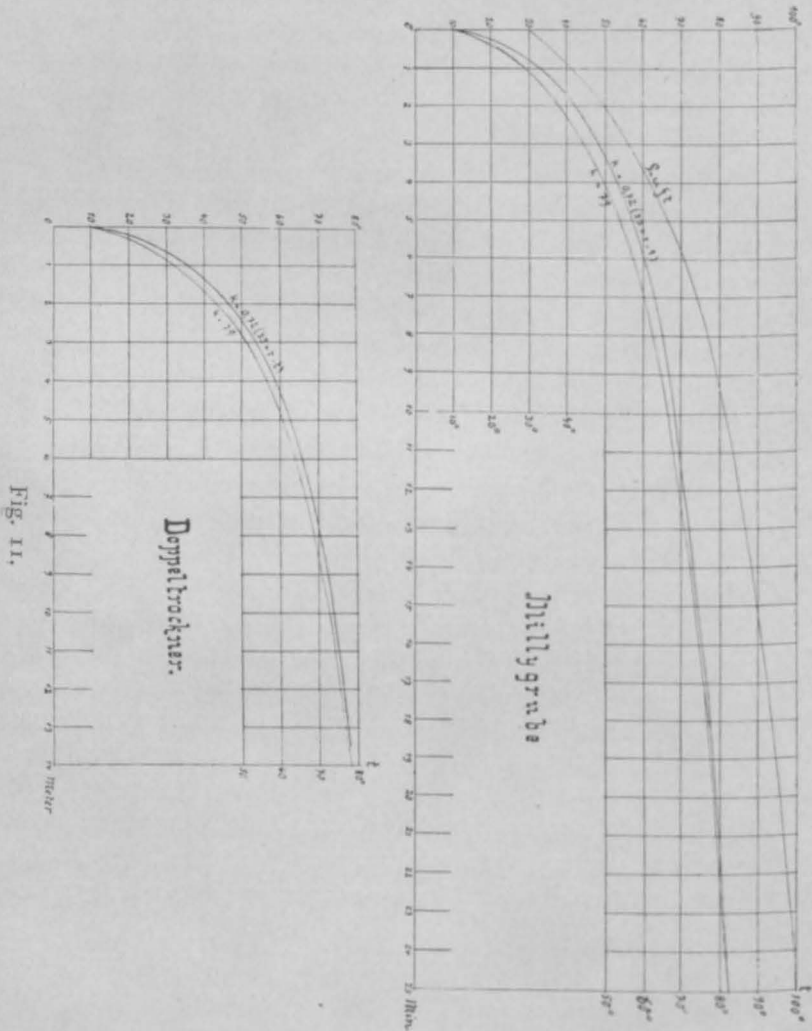
Nimmt man die Formeln für die Wärmeübertragung durch Strahlung und an Luft für richtig an, so können bei der Berechnung gemachte Fehler nicht sehr ins Gewicht fallen, da die Wärmeübertragung mittels dieser Ursachen absolut nicht sehr hoch ist. Das gleiche gilt von falscher Berechnung der spezifischen Wärme des Trockengutes, denn die Differenzen des Wärmegehaltes der Kohle sind nie beträchtlich.

Ähnlich ist es auch bei der Zunahme der Sättigung; der wirkliche Verlauf kann kaum wesentlich von dem gezeichneten abweichen, wenn man überhaupt eine stetige Progression, die ja durch die Versuche ebenfalls nahegelegt wurde, annehmen will. Die Kurve wird vielleicht noch etwas steiler verlaufen, aber beträchtliche Abweichungen über etwa $\pm 5\%$ sind kaum denkbar. Eine größere Unsicherheit herrscht dagegen in der Annahme der Heizflächen, da diese nur aus dem Volumen der Kohle und dessen Änderungen errechnet wurden. Die Endwerte stimmen ungefähr mit Beobachtungen auf Millygrube überein; dagegen sind unmittelbar am Einfall die Rohre bedeutend mehr gefüllt, die Kohle liegt nicht regelmäßig ausgebreitet da, sondern in Klumpen geballt. Es läßt sich daraus nun nicht erkennen, ob die wirkliche Heizfläche größer oder geringer ist als die angenommene. Geringer kann sie sein, wenn die Summe der an der Rohrwand anliegenden Flächen weniger beträgt, als im ausgebreiteten Zustand; dann würde die Wärmeübertragung in der Hauptsache nur durch Strahlung und Luft erfolgen. Über diese Schwierigkeiten wird man auch mit der größten Sorgfalt nicht hinwegkommen.

Man muß sich vielmehr an die früheren Ausführungen erinnern, daß diese Koeffizienten nur scheinbare sind, daß sie lediglich eine Übertragung auf ähnliche Verhältnisse erlauben und keine Allgemeingültigkeit besitzen.

Deshalb liegt auch kein prinzipieller Widerspruch darin, daß die Koeffizienten soviel höher sind als die von Randhahn für Tellerrockner berechneten. Es war bereits früher darauf hingewiesen, daß dessen Berechnungsweise weitaus unsicherer ist als die hier angewendete. Immerhin muß aber dieser Koeffizient bei Tellerrocknern ein ganz bedeutend niedrigerer sein als bei den Röhrenrocknern. Man muß annehmen, daß die Bewegungsart bei letzteren, das unablässige Durcheinanderwälzen, eine bedeutend wirksamere Wärmeverteilung darstellt, als das Schaufeln, bei dem vielleicht die an der Heizfläche aufsitzenden Teilchen zu lange darauf hingeschoben werden, ohne anderen, kälteren Platz zu machen. Da im Teller-

trockner eine regelmäßige Luftbewegung nicht besteht, wird ferner der entstehende Wasserdampf nach allen Seiten diffundieren, so daß die Kohle sich schnell auf eine dem Durchschnittswassergehalt



der Luft entsprechende Temperatur erwärmen muß und die Trocknung hauptsächlich auf dieser Stufe vor sich geht. Der Grund kann aber auch zum Teil in nicht genügender Vorbereitung des Materials, zu grobem Korn, liegen. Man wird eine Klarheit nicht erhalten können, solange nicht Versuche in größerer Anzahl vorliegen, die ja schließlich im eigensten Interesse des Betriebsleiters liegen müssen und wertvolle Fingerzeige zur Erzielung von größter Leistung und Wirtschaftlichkeit bieten können.

Bei der Auflösung der Gleichung hat man in den einzelnen Summanden zugleich die Länge der Teilstücke und den Verlauf der Temperaturen über die Rohrlänge erhalten. Setzt man statt dieser die Durchlaufszeit von 25 Minuten ein, so erhält man auch den Temperaturverlauf in der Zeit und kann ihn graphisch darstellen, indem man die Zeit als Abszisse, die Temperaturen als Ordinaten einträgt.

Dies ist in Fig. 11 für beide Koeffizienten geschehen. Die erhaltenen Kurven zeigen das typische Bild derartiger Vorgänge; zunächst das schnelle Anwachsen der Temperatur bei großer Wärmezufuhr und geringer Verdampfung, und das Verflachen bei Umkehr der Verhältnisse. Wie zu erwarten, tritt dies Verhältnis am schroffsten hervor, wenn der Wärmedurchgangskoeffizient mit der Steigerung der Temperatur abnimmt. Man wird diese Kurve aber als die richtigere ansehen, wenn man bedenkt, daß die Abnahme der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmendem Trocknungsgrad überhaupt nicht berücksichtigt werden konnte.

Es ist deshalb diese Kurve gewählt worden, um an ihr den Wert $\frac{dt}{dz}$ durch Ziehen der Tangenten zu ermitteln. Es ergab sich hierbei:

für $t = 30^0$ eine Temperatursteigerung von 620^0 pro Stunde,

| | | | | | | | |
|---|--------|---|---|---|---------|---|---|
| " | 40^0 | " | " | " | 450^0 | " | " |
| " | 50^0 | " | " | " | 315^0 | " | " |
| " | 60^0 | " | " | " | 175^0 | " | " |
| " | 70^0 | " | " | " | 80^0 | " | " |
| " | 80^0 | " | " | " | 50^0 | " | " |

Will man den Wert $\frac{dt}{dz}$ zu weiteren Rechnungen benutzen, so ist zu beachten, daß diesem Differential entsprechend auch sonst Differentiale gesetzt werden müssen. Wenn allgemein

$$dQ = dF \cdot k(r - t)$$

ist, so gilt auch z. B.:

$$dQ = b \cdot dl \cdot k(r - t).$$

Und ferner ist an Stelle der Gewichte das Gewicht im Querschnitt zu setzen; da z. B. der Inhalt des Rohres an Kohle $\frac{G}{60} \cdot 25$ ist bei 25 Minuten Durchsetzzeit, so ist das Gewicht des Querschnittes

$$G \cdot \frac{25}{60} \cdot \frac{dl}{7} = 15,9 \cdot \frac{25}{60} \cdot \frac{dl}{7}.$$

Entsprechend ist der Inhalt des Luftquerschnittes aus L zu berechnen. Es ist nun:

$$\begin{aligned} & \left\{ b k_k (r - t) + (0,298 - b)(2 + 10 \sqrt{v})(r - 9) \right. \\ & \left. + 4 s \left[\left(\frac{273 + t}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t}{100} \right)^4 \right] \right\} dl \\ & = \left\{ G \frac{25}{60} \cdot \frac{1}{7} (0,20 + 0,80 w - 0,523 x) + L \frac{25}{60} \cdot \frac{1}{7} c_p \right\} dl \frac{dt}{dz} \\ & + r G \frac{25}{60} \cdot \frac{dl}{7} \sigma S_d \left(1 - \frac{x}{w} \right). \end{aligned}$$

Wenn man die Gleichung mit $\frac{7}{dl}$ multipliziert, so ergibt sich:

$$\begin{aligned} & 7 \left\{ b k_k (r - t) + (0,298 - b)(2 + 10 \sqrt{v})(r - 9) \right\} \\ & + 7 \cdot 4 \cdot s \left\{ \left(\frac{273 + t}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t}{100} \right)^4 \right\} \\ & = \left\{ G \frac{25}{60} (0,20 + 0,80 w - 0,523 x) + L c_p \frac{25}{60} \right\} \frac{dt}{dz} \\ & + r G \frac{25}{60} \sigma S_d \left(1 - \frac{x}{w} \right), \end{aligned}$$

d. h., man stellt sich vor, das ganze Rohr befände sich in dem Zustande wie der untersuchte Punkt.

In dieser Gleichung sind nunmehr alle Ausdrücke bekannt bis auf den Wert σ bzw. $\sigma \left(1 - \frac{x}{w} \right)$, d. h. die Geschwindigkeit der Verdampfung. Die Rechnung ist ganz wie im Schema (S. 90) durchzuführen; nur daß an Stelle der Mitteltemperaturen die Temperaturen an der untersuchten Stelle einzuführen sind. Entsprechend der Abstammung der Werte $\frac{dt}{dz}$ ist für k_k der veränderliche Koeffizient $0,72(33 + r - t)$ anzuwenden. Die freien Spannungen sind aus den Tabellen ermittelt, als ob die Messung bei 760 mm Barometerstand vorgenommen wäre.

Eine allzu große Genauigkeit wohnt ja der ganzen Rechnung nicht inne. Aus dieser Rechnung kommt man nun auf nebenstehende Zahlen.

Die Werte $\sigma \left(1 - \frac{x}{w} \right)$ nehmen mit zunehmender Temperatur und Trocknung ab; dagegen ist der Wert σ nicht konstant, wie man

| Kohletemperatur: | $\sigma \left(1 - \frac{x}{w}\right)$: | σ : |
|------------------|---|------------|
| 30 ⁰ | 0,064 | 0,064 |
| 40 ⁰ | 0,064 | 0,064 |
| 50 ⁰ | 0,050 | 0,057 |
| 60 ⁰ | 0,033 | 0,040 |
| 70 ⁰ | 0,021 | 0,030 |
| 80 ⁰ | 0,010 | 0,023 |
| 82 ⁰ | 0,009 | 0,082 |

es hätte erwarten können, wenn die Veränderlichkeit der Verdampfungsgeschwindigkeit durch den Ausdruck $\left(1 - \frac{x}{w}\right)$ allein bestimmt wäre. Vielmehr nimmt σ zunächst ab, um dann am Schlusse wieder anzusteigen, während σ entsprechend Verdunstungsversuch 2 a bei etwa 14⁰ 0,165 sein würde.

Man kann nun den Versuch machen, welches Bild die Kurve ergeben würde, wenn für σ an allen Punkten ein gleicher Wert eingesetzt ist, und zwar am besten bei den hohen Temperaturen, bei denen der Einfluß der Erwärmung am geringsten ist, so daß Fehler in der Ermittlung von $\frac{dt}{dz}$ nur geringe Wirkung ausüben können.

Denn sowohl ist $\frac{dt}{dz}$ hier an sich klein, als ist auch die Wärmekapazität gering. Überträgt man z. B. den bei 82⁰ gefundenen Wert von $\sigma = 0,082$ auf 80⁰ und ermittelt den Wert S_d , der dieser Änderung entsprechen würde, so ergibt sich, daß $S_d = \sim 25$ wäre, gegenüber 97 nach der Kurve, der Taupunkt würde bei 80⁰ höher liegen als bei 82⁰, was natürlich ausgeschlossen ist; oder der Wert $\frac{dt}{dz}$ müßte sehr groß werden, was eine ebenso unwahrscheinliche Temperatursteigerung bedeuten würde.

Es liegt nun nahe, diese Abweichungen darin zu suchen, daß die freie Spannung nicht bestimmt ist durch die mögliche Spannung des Wasserdampfes bei der Temperatur des Trockengutes, sondern daß diese Spannung im Trockengut eine abweichende, in der chemischen Konstitution begründete sei.

Eine gewisse Stütze könnte diese Anschauung in den bei den Versuchen auftretenden Unterschieden der freien Spannung bei den

verschiedenen Heizdampftemperaturen finden. Nimmt man an, daß die Wärmeimmission sich allgemein gleich dem Faktor

$$k_k = 0,33 \cdot 0,72 [100 + 3(t - t)]$$

ändert, so müßte die freie Spannung bei sonst gleichen Verhältnissen, sofern die zur Erwärmung verbrauchte Wärmemenge, wie am Ende, nur verschwindend ist, sich bei 2,5, 3,0 und 3,5 Atm. Heizdampfspannung und bei 80° Temperatur der Kohle verhalten wie 100 : 109 : 133, und bei 70° wie 100 : 116 : 127. In Wirklichkeit war aber nach den Kurven des Hauptversuches das Verhältnis wie 100 : 115 : 142 und 100 : 128 : 160. Nun kann man aber weiter mit Sicherheit annehmen, daß bei höherer Heizdampfspannung die Temperatursteigerung schneller vor sich geht, also der Wert $\frac{dt}{dz}$ größer ist, daß ferner eben deshalb die Trocknung bei Erreichung derselben Temperatur noch nicht so weit vorgeschritten ist, also $\left(1 - \frac{x}{w}\right)$ ebenfalls größer ist. Man würde deshalb zu dem Schlusse kommen, daß der Wert S_1 außerordentlich viel höher sein müßte, als dem Wasserdampf selbst entsprechen würde.

Ist dies an sich unwahrscheinlich, so kommt nun hinzu, daß mit wachsendem S_1 und deshalb auch S_a der Einfluß des Faktors $\left(1 - \frac{x}{w}\right)$ außerordentlich verstärkt werden muß und eine ähnliche Nachrechnung, wie sie für gleiches σ bei 80° und 82° angestellt wurde, noch unmöglichere Resultate liefert.

Aus dem Vorstehenden erhellt, daß der Grund für alle diese Schwierigkeiten vornehmlich in dem Faktor $\left(1 - \frac{x}{w}\right)$ liegt, der bei kleinen Werten von x infolge seiner schnellen Änderung außerordentlich ins Gewicht fällt.

Einem solchen Gesetz widerspricht weiter die ganz auffallende Erscheinung, daß überhaupt anscheinend zusammengehörige Kurven entstehen konnten, obwohl infolge der starken Luftschwankungen die Bedingungen hierfür so ungünstig wie möglich waren. Die Schwankungen machen sich nur dadurch bemerklich, daß die Stationen nicht gleichmäßig verteilt sind, sondern bald näher aneinanderrücken, bald sich voneinander entfernen. Das gleiche kann man bei einem Vergleich der Kontrollversuche mit den Hauptversuchen beobachten. Es war von vornherein nicht zu erwarten, daß bei der Unsicherheit der Messung dieselben Resultate erhalten werden könnten. Die Abweichungen sind aber doch recht geringe und, da sie ganz regel-

mäßige sind, wohl durch die Verwendung des geänderten Meßstabes zu erklären. Da es aber ausgeschlossen war, daß die Luftmenge dieselbe sein konnte, hätte man eine beträchtliche Abweichung erwarten dürfen. Nimmt man weiter an, daß in den einzelnen Stationen bei gleicher Heizdampfspannung die Trocknung auch annähernd gleich war, so muß es auffallen, daß z. B. bei 3,5 Atm. die Sättigung bei Station VIII des Kontrollversuches der von Station V des Hauptversuches entspricht und dergl. mehr. Auf Grund dieser Beobachtungen wurde denn auch im Kontrollversuch über 2,5 Atm. absichtlich eine Umstellung der Drosselklappe vorgenommen mit dem Ergebnis, daß die Temperaturen der Stationen IV und VIII ziemlich gleich wurden; bei Station IV hätte infolge der vorgeschrittenen Trocknung und des kleineren Wertes $\left(1 - \frac{x}{w}\right)$ demgemäß eine beträchtlich höhere freie Spannung herrschen müssen; statt dessen fügt sich auch hier die Verbindungslinie zwanglos dem ganzen Bilde ein.

Nach alledem kommt man zu dem Schlusse, daß der Faktor $\left(1 - \frac{x}{w}\right)$ nicht die vermutete Geltung haben kann, denn es ist nicht wahrscheinlich, daß etwa in der Wärmezufuhr eine gleiche Änderung eintreten wird. Die Wärmeleitfähigkeit wenigstens ist nach Nusselts Versuchen nicht so stark veränderlich.

Ebenso ist in der Hauptsache nachgewiesen, daß mit zunehmender Trocknung die freie Spannung wächst.

Es erscheint aber nicht richtig, daß der Trocknungsgrad selbst die direkte Ursache dieser Erscheinung ist, es dürfte vielmehr die bereits früher erwähnte Anschauung zutreffen, daß allein das Wärmegefälle den Grund bildet. Das einzelne Korn setzt sich unter der Einwirkung äußerer Wärmezufuhr aus einzelnen Schichten verschiedener, nach dem Innern immer mehr abnehmender Temperatur zusammen; der Durchschnittstemperatur entsprechend stellt sich die freie Spannung ein; der Unterschied zwischen der Temperatur in der Außenhaut, die man allein messen kann, und der Durchschnittstemperatur wird um so größer sein, je größer das Korn selbst ist und je kürzere Zeit verstrichen ist, seitdem die Außenhaut ihre Temperatur angenommen hat. Es bildet sich ein Temperaturgefälle aus, das um so größer wird, je weiter die Trocknung nach innen vorgeschritten ist; besitzen die äußeren Schichten noch ihren vollen Wassergehalt, so wird die zugeführte Wärme in der Hauptsache bereits in diesen verbraucht, die inneren Schichten bleiben unberührt. Je mehr verdampft ist, um so länger braucht die Wärme

Zeit, um an den Ort zu gelangen, wo sie wirksam werden soll, und es gelangt entsprechend dem Wärmegefälle eine geringere Menge ans Ziel. Bei sehr langsamer Wärmezufuhr kann dann die Verdampfung der Form $\left(1 - \frac{x}{w}\right)$ entsprechen. Anders ist es, wenn gleichzeitig eine Temperatursteigerung stattfindet. Dann nimmt das Wärmegefälle, wie bereits auf Seite 56 auseinandergesetzt wurde, zu und die Verdampfung wird geringer werden. Nimmt die Temperatur langsam zu, was gegen Ende der Trocknung der Fall ist, so wird ein Ausgleich stattfinden, die Verdampfungsgeschwindigkeit also relativ steigen. Dagegen nimmt, wie früher erörtert, mit zunehmender Temperatur des Trockengutes das Wärmegefälle im Innern der Körnchen zu, die mittlere Temperatur liegt beträchtlich unter der der Außenhaut; entsprechend geringer ist die maximale Spannung des Wasserdampfes, was bei den großen Änderungen der Spannung in höheren Temperaturstufen trotz Verringerung der Wärmezufuhr eine Erhöhung der beobachteten freien Spannung zur Folge hat, die nach der Spannung des gesättigten Wasserdampfes bei der beobachteten Temperatur der Außenhaut der Körnchen berechnet wird.

Rechnerisch wird man diesen Verhältnissen natürlich nicht beikommen können; selbst wenn das auf Grund der Annahme eines absolut runden Körpers gelingen würde, stünde einer Anwendung entgegen, daß man die Korngrößen und das Verhältnis der einzelnen Korngrößen untereinander nicht bestimmen kann.

Man wird sich deshalb auch hier damit begnügen müssen, von einer scheinbaren Verdampfungszahl zu sprechen, und lediglich die Bedingungen festzustellen, die diese zu einer möglichst günstigen machen.

Es bietet ferner das td -Diagramm die Möglichkeit, unter Anlehnung an bekannte Verhältnisse sich ungefähr über die Wirkungen klar zu werden, die unter anderen Bedingungen, aber bei im wesentlichen ähnlicher Führung des Trockenprozesses, erzielt werden.

Das Spannungsdiagramm ist meist entbehrlich, wenn man nicht über die Wirkungen abweichender Barometerstände unterrichtet zu sein wünscht.

Als solche Veränderungen, die am td -Diagramm studiert werden können, können insbesondere Änderungen in der zugeführten Wärmemenge gelten. Und zwar wird man hauptsächlich die Endzustände bei annähernd gleichem Trocknungsgrad ins Auge fassen; man kann dann ungefähr sagen, daß die freie Spannung sich mindestens in demselben Verhältnis wie die Wärmezufuhr

in der Zeiteinheit auf die Gewichtseinheit Rohgut ändern wird.. Führt man die doppelte Menge Trockengut in der doppelten Zeit über dieselbe Heizfläche, so wird sich die freie Spannung am Ende annähernd auf die Hälfte reduzieren.

Bei Beginn der Trocknung dagegen kommt die Erhöhung des Wertes $\frac{dt}{dz}$ ganz besonders zum Vorschein; da lediglich die Differenz der gelieferten und zur Erwärmung verbrauchten Wärme zur Verdampfung übrig ist und diese durch die Verdoppelung des Quantums unverhältnismäßig geringer wird, so muß hier die freie Spannung um beträchtlich mehr als die Hälfte sinken. Dadurch tritt aber eine Zurückverlegung des gesamten Temperaturverlaufes derart ein, daß bedeutend mehr Wasser verdampft und Wärme verbraucht wird gerade bei den Temperaturen, bei denen die Wärmedurchgangszahlen am günstigsten sind; es wird also zugleich mit der geringeren freien Spannung, die größere Wirtschaftlichkeit bedeutet, auch eine Erhöhung der Leistung eintreten.

Da die freie Spannung vom Wärmegefälle abhängig ist, werden zu ihrer Verminderung auch alle die Mittel dienen, die zur Herbeiführung einer guten Wärmeübertragung helfen. Es ist das kleines Korn, das besonders am Ende vorteilhaft wirkt, da hier das Wärmegefälle am stärksten ist, es ist ferner auch ein gutes Durcheinandermischen, das unter den einzelnen Körnern selbst gleiche Temperatur hervorbringt. Und gleich der Verringerung der Wärmezufuhr werden auch diese Maßnahmen dazu dienen, die Kurve der von gesättigter Luft zu nähern, und infolgedessen zu einer Steigerung der Leistung beitragen.

Durch diese Momente ist im wesentlichen der Verlauf der d -Kurve bestimmt; an ihr wird die Sättigung hinauf-
laufen bis zu dem Punkt, wo je nach der gleichzeitig zugeführten Luftmenge der gewünschte Trocknungsgrad erreicht ist.

III. Praktischer Teil.

A) Der Betrieb von Trockenanlagen.

Im Teller Trockner besteht, wie bereits erwähnt, kein derart kontinuierlicher Verlauf wie im Röhrentrockner, da Kohle und Luft nicht dauernd zwangsweise miteinander geführt werden, vielmehr der entweichende Wrasen sich aus den Teilströmen der einzelnen Teller

zusammensetzt, im übrigen aber eine ungehinderte Diffusion des Wasserdampfes durch den ganzen Apparat stattfindet. Diese Diffusion hat zur Folge, daß über ausgedehnte Teile des Verlaufs der Trocknung annähernd die gleiche Spannung des Wasserdampfes herrscht, so daß im Anfang die gesamte zugeführte Wärmemenge allein zur Erwärmung verwendet wird, die Temperatur der Kohle sehr schnell auf die Durchschnittstemperatur steigt und auch auf dieser bis zum Ende verharret. Der Vorgang wird aber durch das verschiedentliche Öffnen und Schließen der Türen beeinträchtigt, so daß eine dauernd sichere Einstellung des Trockenvorgangs nicht möglich ist. Da nun weiter die Endtemperaturen niedriger sind, wird sich mit dem Teller-trockner nie die gleiche Wirtschaftlichkeit erreichen lassen wie mit dem Röhrentrockner, wenn sich auch durch die von Foos vorgeschlagene zwangsweise Luftführung jedenfalls noch eine Verbesserung erzielen lassen wird.

Dafür besitzt er aber zwei Vorteile, die ihm trotzdem den Wettbewerb ermöglicht haben, das ist die gleichmäßigere Trocknung und geringere Staubentwicklung. Dies ist zum Teil der Zwischenzerkleinerung zuzuschreiben, aber auch die sonstigen Verhältnisse sind nicht ohne Einfluß hierauf. Bei der im wesentlichen über den ganzen Verlauf gleichen freien Spannung geht die Trocknung stets gleichmäßig vor sich, die einzelnen Teilchen verhalten sich wie bei dem Verdunstungsversuch; natürlich wird auch hier das feinere Korn schneller getrocknet als das gröbere, aber es wird bereits zu einer Zeit abgezogen, wo die Erwärmung und Trocknung noch nicht zu weit fortgeschritten ist. Nach der erfolgten Zerkleinerung sind ferner die Abmessungen der Körner nicht mehr so verschieden, daß sich sehr erhebliche Unterschiede im Trockengrad bilden können.

Anders steht es beim Röhrentrockner. Hier bleiben Staub und Knorpel bis zum Verlassen des Apparates zusammen. Um den gewünschten mittleren Trockengrad zu erhalten, müssen die feineren Körner um so schärfer getrocknet werden, je mehr gröbere Körner vorhanden sind, die im Trockengrad zurückbleiben.

Da das Zurückbleiben der Taupunktskurve gegenüber der Kurve des gesättigten Wasserdampfes eine Folge des Wärmegefälles im Innern der Körner ist, so muß die Taupunktskurve um so näher der Kurve gesättigten Wasserdampfes liegen, je kleiner das Korn ist. Der jeweils gemessene Taupunkt bzw. die bei einem Gemisch beobachtete Kurve stellt nun einen mittleren Wert des Taupunktes dar und zugleich die mittlere freie Spannung. Ein Korn, das

kleiner ist als das Mittelgut, befindet sich also ständig unter einer um so viel zu großen freien Spannung, als die Differenz zwischen der vorhandenen und derjenigen freien Spannung beträgt, die eintreten würde, wenn bei derselben Wärmezufuhr und derselben Temperatur des Trockengutes alle Körner dieselbe Abmessung besäßen, wie das betrachtete kleinere Korn. Und umgekehrt steht es bei größeren Körnern, die einer zu kleinen freien Spannung unterliegen. Da die Kurven mit Zunahme der Temperatur sich immer weiter von der Kurve des gesättigten Dampfes und voneinander entfernen, so ergibt sich, daß die Unterschiede der freien Spannung und damit der Trocknungsgrade um so mehr zunehmen, je höher die Temperaturen werden. Es ergibt sich, daß eine Übertrocknung der feineren Körner um so weniger zu befürchten ist, je kleiner die herrschende freie Spannung überhaupt ist, je geringer also die Temperatur selbst ist und weiter, je geringer die Wärmezufuhr in der Zeiteinheit ist. Beim Tellertrockner ist die freie Spannung über den ganzen Verlauf des Trocknens ziemlich konstant, sie braucht also nicht zu so hohen Beträgen aufzusteigen wie beim Röhrentrockner, in dem in niedrigen Temperaturen nur eine geringe freie Spannung herrscht. Weiter aber treten so hohe Endtemperaturen wie beim Röhrentrockner hier nicht auf. Unter der Wirkung dieser allzu hohen freien Spannungen am Ende der Trocknung findet im Röhrentrockner eine stürmische Verdampfung in den feinen Teilchen statt, die zu einer Lockerung des Zusammenhangs, Zerfall oder Vermehrung der Porosität führt. Nicht der freie Fall beim Austritt aus der Trommel, den man auf mancherlei Weise zu mildern versucht, ist die Ursache der Staubbildung, der Staub ist vielmehr schon gebildet, und durch solche Vorrichtungen wird nur verhütet, daß die Aufwirbelung und Verschleppung in den Schlot allzu beträchtlich wird. Bei der Innentstaubung wiederholen sich die Schwierigkeiten der Entstaubung bei den mit Röhrentrocknern ausgestatteten Fabriken.

Die infolge der Trocknung eintretende Porosität verwandelt die Kohle in eine Kontaksubstanz; je stürmischer die Verdampfung verlief, um so größer wird die Porosität, um so größer auch die Aktivität der Substanz. Wie Graefe („Braunkohle“, 1910, Heft 11) festgestellt hat, ist die getrocknete Kohle in ganz bedeutendem Maße befähigt, Sauerstoff aufzunehmen, teilweise zu verdichten, teilweise in Kohlensäure umzuwandeln. Solche Vorgänge sind mit Wärmeentwicklung verbunden und gehen um so schneller vor sich, je höher Porosität und Temperatur sind; beides vereint bei Röhrentrocknern,

um eine bedeutend höhere Explosionsgefahr hervorzubringen als bei Tellertrocknern.

Wie die Wärmeaufnahme wird auch die Wärmeabgabe durch das Wärmegefälle im Innern der Körper verzögert. In den früheren Sammelräumen wurden die porösen Substanzen nur sehr langsam abgekühlt und hatten so lange Zeit, unter dauernder Einwirkung von Wärme ihr Wasser auszutauschen und Luft zu resorbieren, was denn auch gelegentlich zu Bränden und Explosionen führte.

Zieht man den feinen Staub vor Beendigung der Trocknung und Erreichung hoher Temperaturen ab und schafft zugleich nach Möglichkeit geringe freie Spannung, so wird man dem geschilderten Nachteil der Röhrentrockner ohne Schwierigkeit abhelfen können.

Die Röhrentrockner haben seit ihrer ersten Anwendung eine grundlegende Änderung nicht erfahren; insbesondere sind die Hauptabmessungen, Rohrlänge und Rohrweite, ziemlich unverändert geblieben. Nur hat man deren immer mehr in eine Trommel zusammengefaßt und die Leistung gesteigert, indem man die Heizdampfspannung allmählich immer mehr erhöhte, von 0,10 bis 0,25 Atm. Überdruck im Anfang bis zu der jetzt meist gebräuchlichen Heizdampfspannung von 4 Atm. absolut und darüber hinaus, und indem man die Wärmeabgabe durch Einführung der Dampfzirkulation längs der Heizwände verbesserte. Die Wendeleisten begünstigen die Durchmischung des Materials und erhöhen zugleich die wirksame Heizfläche sowohl durch Ausbreiten des Materials an den Rohrwänden als auch durch Wärmeleitung längs der Wendeleisten selbst.

Der Einfluß, den alle diese die Wärmezufuhr vergrößernden Abänderungen auf den Betrieb ausgeübt haben, läßt sich am besten erkennen, wenn die Gesichtspunkte über die zweckmäßigste Einstellung eines gegebenen Apparates klar geworden sind.

Es kann keinem Zweifel unterliegen, daß die größte Leistungsfähigkeit bei möglichst großer Füllung der Rohre erzielt werden kann, denn je größer die Füllung, um so mehr Wärme wird an die Kohle abgegeben bei einem Wärmeübergangskoeffizienten, der weit aus größer ist als der gegen Luft. Da nun die Kohlenmenge erheblich schneller steigt — wenigstens bis zur Hälfte des Querschnittes — als der Gewinn der Heizfläche beträgt, so ist zugleich eine Verminderung der Tourenzahl erforderlich, falls der Trockengrad nicht leiden soll.

Das Trockengut muß länger im Rohr verweilen, die Wärmezufuhr auf die Einheit in der Zeiteinheit ist geringer. Auch dies

ist günstig, denn es bewirkt eine Annäherung der Taupunktskurve an die Kurve gesättigten Wasserdampfes; je größer diese Näherung ist, um so mehr Wasser wird bereits bei niederen Temperaturen verdampft, um so besser ist also die Leistung, um so größer wird zugleich die Wirtschaftlichkeit bei gleicher Endtemperatur des Trockengutes. Zugleich wird ferner der Luft eine kleinere Wärmemenge zugeführt, da die auf Luft wirkende Heizfläche kleiner wird, und infolgedessen die Übertemperatur der Luft gegenüber der Kohle herabgedrückt, während die eine Wärmeabgabe an die Kohle vermittelnde Berührungsfläche von Luft und Kohle, wenn auch nur wenig, wächst. Ebenso wird infolge der geringeren freien Spannung die Bildung von gefährlichem Kohlenstaub verringert und eine gleichmäßigere Trocknung erzielt.

Wenn nun auch demnach eine hohe Füllung außerordentliche Vorteile verspricht, so stellen sich doch sehr bald Schwierigkeiten ein, die Grenzen setzen.

Das ist zunächst die Aufnahmefähigkeit der Rohre selbst; das aus den Rohren zurückfallende Quantum Kohle wird mit langsamerer Umdrehungszahl immer größer, so daß die Aufnahmefähigkeit nicht der Verminderung der Umdrehungszahl entsprechend wächst, und man bald auf dem Punkte angelangt ist, wo eine Vergrößerung der Füllung nicht mehr eintritt. Mit der langsamen Umdrehungszahl leidet aber schließlich die Intensität des Mischens selbst, insbesondere am Eintrittsende. Es wird hier lediglich ein Drehen des Kohleninhaltes mit dem Rohr eintreten, bis durch die Trocknung an den Heizwänden ein Nachrutschen ermöglicht wird, so daß ein beträchtlicher Teil des Rohres von der vollen Wirksamkeit ausgeschaltet wird.

Dieser Kohlenpfropfen aber besitzt eine weitere sehr unangenehme Nebenwirkung, indem er den Zutritt der Luft erschwert.

Hat man durch die Füllung bei im übrigen gegebenen Verhältnissen den Lauf der Taupunktskurve festgelegt, so wird die Endtemperatur der Trockenkohle durch die Menge von Luft bestimmt, die zugleich mit dem Trockengut das Rohr durchströmt. Je mehr man Luft zuführt, um so niedriger wird die Endtemperatur; um so größer wird auch die Leistung sein, da sie ja durch die Wärmedifferenz zwischen Heizwand und Trockengut bedingt wird. Durch die Endtemperatur wird aber zugleich die Wirtschaftlichkeit des Trockenvorganges bestimmt. Mit steigender Endtemperatur des Trockengutes wird die in 1 kg trockener Luft enthaltene Wassermenge größer, nimmt aber zugleich auch die Endtemperatur der Luft zu, und zwar in stärkerem Maße als die Temperatur des Trocken-

gutes, da wohl die Wärmezufuhr zur Luft gleichbleibt, die Wärmeabgabe an die Kohle aber wegen deren höherer Temperatur vermindert wird. Der Erfolg ist, daß mit zunehmender Endtemperatur die Wirtschaftlichkeit steigt, aber in immer schwächerem Maße, so daß z. B. von 90° Endtemperatur an die Besserung kaum mehr merkbar ist. Dagegen nimmt mit steigender Endtemperatur die Wärmemenge zu, die mit dem Trockengut abgeführt wird. Wenn schon ein Teil dieser Wärme durch die Nachtrocknung wieder nutzbar gemacht wird, so steht er doch in keinem Verhältnis zu der überschüssig abgehenden Menge. Je nach dem Verhältnis, in dem die verdampfte Wassermenge zur Menge des Trockengutes steht, verschiebt sich also der Punkt der günstigsten Wirtschaftlichkeit; je mehr Wasser zu verdampfen ist, um so höher kann die Endtemperatur getrieben werden.

Im allgemeinen aber ergibt sich aus einer Nachrechnung der Verhältnisse, daß bei einer Heizdampfspannung von 4 Atm. absolut ein Emportreiben der Endtemperatur über 85° den Wärmeverbrauch eher ungünstig als günstig beeinflusst, der Leistung aber außerordentlichen Abbruch tut.

Die Luftmenge steht nun in einer besonderen Beziehung zur Füllung der Rohre. Bei Ventilation durch den natürlichen Luftzug regelt sich die Luftmenge dergestalt selbsttätig, daß der durch das Mindergewicht der erwärmten und wasserführenden Luft erzielte Auftrieb den Luftwechsel bewerkstelligt. Ist der auf dem durchlaufenen Wege gebotene Widerstand groß, so muß die Luft durch hohe Erwärmung und große Wasseraufnahme einen Auftrieb erhalten, der genügend ist, ein wenn auch kleineres Luftvolumen zu bewegen; ist der Widerstand gering, so kann viel Luft selbst bei geringem Wassergehalt und niedriger Endtemperatur den Apparat durchlaufen. Mit zunehmender Füllung der Rohre verengt sich der Eingangsquerschnitt immer mehr, bis er schließlich durch die locker aufgeschüttete Kohle vollständig verstopft wird. Die Folge ist, daß immer weniger Luft Zutritt, aber entsprechend mehr Wasser von der Gewichtseinheit Luft aufgenommen wird; die Endtemperatur der Kohle läuft die Kurve entlang in die Höhe, die Wärmedifferenz zwischen Heizdampf und Trockengut wird geringer, damit zugleich Wärmeaufnahme und Leistung. Der durch die Vergrößerung der Heizfläche errungene Vorteil wird durch die geringere Wärmeabgabe wieder aufgewogen.

Das Problem heißt also nicht nur hohe Füllung, sondern hohe Füllung bei hoher Luftzufuhr.

Es läßt sich nicht allein durch Beschaffung eines starken Ventilators lösen, da die dann erforderlich werdende Kraft eine außerordentlich hohe wird; denn um die doppelte Luftmenge bei gegebener Temperatur durch die Apparate zu bewegen, ist die achtfache Arbeit erforderlich. Vielmehr ist es nötig, den der Luft entgegengesetzten Widerstand möglichst klein zu machen.

Hierauf basiert die große Wirksamkeit der Rolffschen Einblasevorrichtung, die den Kohlenpfropfen am Eintrittsende zerstört, die Kohle einebnet und der Luft ungehinderten Zutritt verschafft. Sie ermöglicht große Füllung mit günstiger Lage der Taupunktskurve, bewirkt durch die Einebnung der Kohle auch ein wirklich günstiges Anschmiegen an die Heizwand; durch die injektorartige Wirkung der Düsen tritt eine kräftige Luftbewegung ein und wird die Luftmenge dadurch selbst vergrößert, so daß sich mit der Vergrößerung der Füllung zugleich eine Zurückverlegung der Temperatur einstellt, die die Leistung in der bekannten günstigen Weise (man vergleiche den Bericht über die Untersuchung auf der Brikettfabrik Lauchhammer) beeinflußt.

Eine zu hohe Endtemperatur der Kohle ist eine sehr häufige Erscheinung; sie macht sich unangenehm bemerkbar durch die damit in Verbindung stehenden hohen Endtemperaturen der Luft, die z. B. den Bethfiltern leicht gefährlich werden, ferner aber durch Kondensation des wasserreichen Wrasens. In solchen Fällen empfiehlt es sich, die Füllung zu vermindern und die Apparate schneller laufen zu lassen. Namentlich bei den mit künstlicher Luftführung ausgestatteten Apparaten kann sich diese Erscheinung als Folge zu klein bemessener Ventilatoren zeigen.

Der bereits erwähnte, im Laufe der Zeit erfolgte Übergang zu immer größerer Wärmezufuhr an den Heizflächen hat zur Folge gehabt, daß sowohl die Durchsetzzeit verkürzt, als die Füllung vergrößert wurde, während zugleich im allgemeinen der Trocknungsgrad ein besserer wurde. Die Verkürzung der Durchsetzzeit kann erfolgen, insoweit die Wärmezufuhr in der Zeiteinheit gesteigert wird, sie bedingt ein Abrücken der Taupunktskurve von der Linie gesättigten Wasserdampfes. Das gleiche erfolgt, wenn der Trockengrad ohne Erhöhung der Durchsetzzeit verbessert wird. Würde dagegen bei gleichbleibender Durchsetzzeit und gleichem Trockengrad die Mehrleistung allein durch Vergrößerung der Füllung erzielt, so würde wohl die Kurve unverändert bleiben, dagegen infolge Verringerung der Luftzufuhr die Endtemperatur steigen.

Da beide Wirkungsmöglichkeiten vereinigt sind, ist sowohl die freie Spannung als auch die Endtemperatur gestiegen.

Um bei höheren freien Spannungen die gleiche Wirtschaftlichkeit wie bei niederen zu erzielen, ist es erforderlich, die Endtemperaturen höher zu nehmen, und zwar muß der Taupunkt selbst bereits höher liegen, um die zugleich wachsenden Lufttemperaturen auszugleichen; infolge der höheren freien Spannungen ist aber bereits bei gleichem Taupunkt die Endtemperatur eine höhere. Es ergibt sich so, daß die durch die größere Füllung erzeugte höhere Endtemperatur auch im Interesse der Wirtschaftlichkeit vorteilhaft ist. So kommt es denn, daß die Wirtschaftlichkeit sämtlicher Trockner, mögen sie mit höherer oder niederer Heizdampfspannung betrieben werden, annähernd gleich ist.

In der Literatur sind Angaben über die Endtemperaturen kaum zu finden. Man kann den Gang der Entwicklung aber trotzdem verfolgen, z. B. aus der in Richter-Horn, Die mechanische Aufbereitung usw., S. 110, gegebenen Tabelle. Es ist hier ganz richtig erkannt, daß die relative Sättigung mit zunehmender Endtemperatur des Wrasens — Folge zunehmender Endtemperatur der Kohle — immer geringer wird. Nur ist nicht der hierfür angesprochene Grund maßgebend, daß bei höherer Temperatur die Einstellung der Luftmenge schwieriger wird, sondern die Ursache ist zunächst die Form der Taupunktskurve selbst und deren Zurückverlegung bei den höheren Endtemperaturen zu Grunde liegenden höheren Heizdampfspannungen.

Diese gewissermaßen von selbst eintretende Erhöhung der Endtemperatur bei Erhöhung der Heizdampf Temperatur hat nun den Anlaß zu der weitverbreiteten Anschauung gegeben, daß die Leistung der Trockner um so größer wird, je mehr man die Endtemperatur steigert. Diese Anschauung findet scheinbar eine Stütze darin, daß ein Stoff bei höherer Temperatur schneller trocknet als bei niedrigerer. In Wirklichkeit aber wird die Wärmeübertragung mit abnehmender Wärmedifferenz geringer, und es kann nie mehr Wasser verdampft werden, als der zugeführten Wärme entspricht. Die höhere Endtemperatur bedeutet vielmehr eine Minderung der durch die Erhöhung der Heizdampf Temperatur zu erzielenden Mehrleistung, ist aber bis zu dem jeweils zweckmäßigen Maße durch Rücksichten der Wirtschaftlichkeit gerechtfertigt und durch die Vergrößerung der Füllung gegeben.

Die richtige Einstellung von Füllung und Umdrehungszahl ist eine schwierige Betriebsmaßnahme; sie wird meist rein

empirisch vorgenommen und zeigt deshalb von Grube zu Grube wesentliche Unterschiede, die ja allerdings auch zum Teil durch die Verschiedenheit des Materials und dessen Vorbereitung bedingt sind. Unter Berücksichtigung der vorstehenden Ausführungen kann man aber die Wirkung aller Maßnahmen rechnerisch vorherbestimmen, falls man Endtemperatur der Kohle und zugehörigen Taupunkt bestimmt hat. Aus diesem so gewonnenen Punkt der Taupunktskurve kann man die ganze Kurve mit ziemlicher Sicherheit rekonstruieren. Bei dem Vergleich der bei verschiedenen Füllungen erhaltenen Kurven bezw. Kurvenpunkte kann man sich ein Bild davon machen, in welchem Zusammenhang Trockengrad, Leistung und Wirtschaftlichkeit stehen, inwieweit eine Veränderung der Endtemperatur nützlich und in Ansehung der Luftzufuhr möglich ist.

Hierzu ist es allerdings erforderlich, die Endtemperatur der Kohle möglichst unmittelbar am Austragende messen zu können. Bei neueren Anlagen ist jetzt bereits vielfach vorgesehen, daß unmittelbar oberhalb des Austrages in die Sammelschnecke ein Kohlenquantum abgelassen werden kann. Zweckmäßiger würde es sein, in die Kohlenabfallutte einen prismatischen Behälter einzubauen, wie er bei dem Versuchsapparat geschildert wurde, den man in die Fallrichtung der Kohle zum Auffangen hineindrehen und in dessen horizontale Achse man ein Thermometer von außen einbringen kann.

Die Schwierigkeit der Einstellung hat es mit sich gebracht, daß an Füllung und Umdrehungszahl gewöhnlich in langen Zeiträumen nichts mehr geändert wird, und daß die einmal erprobte Lufteinstellung unberührt bleibt, bei natürlichem Luftzug die Querschnitte der Luftkanäle usw., bei künstlichem die Umdrehungszahl des Ventilators.

Die Größe der Luftzufuhr wird nun aber, namentlich bei natürlichem Luftwechsel, durch den Zustand der Atmosphäre (Barometerstand, Wind, Temperatur der Außenluft) in weiten Grenzen verändert. So durchziehen namentlich nachts ganz unverhältnismäßig größere Luftmengen die Apparate als bei Tage. Die Folge ist, daß in der Nacht die Endtemperaturen von Kohle und Luft beträchtlich sinken, die Wärmeabgabe der Heizflächen entsprechend steigt, die Kohle wesentlich besser getrocknet wird, aber zugleich die Wirtschaftlichkeit leidet. Es wird nicht nur mehr Wasser verdampft als nötig wäre, sondern die gesamte Wassermenge auch mit einer geringeren Wirtschaftlichkeit, wozu noch kommt, daß nachts die nutzbringende vorherige Verwendung des Dampfes in Dampf-

maschinen meist nur zu einem geringen Teil möglich ist. Ganz ähnlich liegen die Verhältnisse im Winter; auch hier wird sich besserer Trocknungsgrad finden, während gerade in dieser Jahreszeit der Hauptwert in der Leistung zu suchen sein dürfte. Der größere Wassergehalt der Außenluft im Sommer ist an sich bedeutungslos und macht lediglich eine entsprechende Erhöhung der Luftmenge erforderlich; dagegen leidet an heißen Sommertagen die Fabrikation an ungenügendem Auftrieb der Luftsäule.

In der Praxis wird die Einstellung des gewünschten Trockengrades fast ausschließlich durch die Veränderung der Heizdampfspannung bewirkt und insbesondere eine Erhöhung des Wassergehaltes der Rohkohle durch eine Erhöhung der Dampfspannung ausgeglichen. Dies Mittel ist an sich bequem, aber mit unangenehmen Nebenwirkungen auf die angeschlossenen Dampfmaschinen verbunden. Zugleich aber wird infolge der Verlegung der Taupunktskurve und der gleichbleibenden Luftzufuhr die Endtemperatur erhöht, die Erhöhung der Wärmedifferenz also zum Teil wieder unwirksam gemacht. Verstärkt man aber gleichzeitig die Luftzufuhr, so kommt man mit einer weit geringeren Erhöhung der Heizdampfspannung aus.

Alle die Schwankungen an Wirtschaftlichkeit und Trockengrad, die durch die verschiedensten Umstände entstehen, entziehen sich der Kenntnis, solange nicht ein Mittel zu ihrer Beobachtung vorhanden ist.

Ein solches ist allein das Hygrometer, und zwar ist das Haarhygrometer schon wegen der Schwierigkeit der Berechnung, dann aber wegen seiner Ungenauigkeit und Empfindlichkeit gegenüber Staub zu diesem Zwecke untauglich.

Das eingangs beschriebene Kondensationshygrometer zeigt diese Unvollkommenheiten nicht; es ist gegenüber Staub und der im Betrieb unvermeidlichen, wenig sorgfältigen Behandlung unempfindlich und es erfordert weiter bei seiner Benutzung keine rechnerische Kenntnis vom Aufseher.

Denn wenn einmal von der Betriebsleitung der zweckmäßige Taupunkt der Luft bestimmt ist, so kann er künftig beibehalten werden und legt damit zugleich die Wirtschaftlichkeit des Betriebes fest, bei gleichbleibendem Rohmaterial auch den Trockengrad. Nur muß dafür gesorgt werden, daß die Temperatur des Kühlwassers einigermaßen konstant bleibt, um eine Verstellung der Hubhöhe des Hygrometers während längerer Zeiträume unnötig zu machen. Dann braucht bloß darauf geachtet zu werden, daß bei gleicher Zahl der Umdrehungen die gleiche Wassermenge aus dem Kondensator ab-

läuft. Bei mechanischem Antrieb von einer Transmission aus und bei annähernd gleichbleibenden Umdrehungszahlen kann weiter in einfacher Weise durch Klingelzeichen selbsttätig Meldung gegeben werden, falls die eingestellte Wassermenge über- oder unterschritten wird. Auch der mit dem Barometerstand wechselnde Wassergehalt von 1 kg Luft bei demselben Taupunkt wird von dem Apparat selbsttätig, wenigstens bis zu einem gewissen Grade, berücksichtigt, indem bei niedrigem Barometerstand bereits diesem entsprechend weniger Luft durch das Hygrometer gesaugt wird. Die zur Ermittlung der Wärmebilanz erforderliche Berücksichtigung des Barometerstandes kommt also für den vorliegenden Zweck nicht in Frage.

Eine regelmäßige Beobachtung des Zustandes der abziehenden Luft wird nicht nur den Aufseher zu Verständnis und Sorgfalt erziehen, sondern auch dem technisch gebildeten Leiter Aufklärungen über die Einzelheiten des Betriebes und die Möglichkeit zur besten Ausnutzung der Anlage bieten.

Immerhin ist man bei vorhandenen Anlagen in den Mitteln beschränkt, mit denen man besseres und sparsameres Arbeiten erzielen kann. Es möge deshalb hier nochmals auf die verhältnismäßig leicht einzuführende möglichst hohe Vorzerkleinerung der Kohle aufmerksam gemacht werden, die in jeder Weise vorteilhaft wirkt. Sie gibt der Taupunktskurve eine günstigere Lage und hat nicht eine Vermehrung, sondern Verminderung der Staubbildung zur Folge.

B) Allgemeine Gesichtspunkte für eine zweckmäßige Gestaltung der Trocknung.

Aus dem Vorausgegangenen ist ersichtlich, daß es von größter Wichtigkeit ist, die Wärmezufuhr in angemessener Weise über die Zeit zu verteilen.

Eine Vergrößerung der Heizfläche allein kann nicht schon den Erfolg verbürgen. Als Beispiel sei der bei Franke, a. a. O., S. 426, angeführte Röhrentrockner von 8 m Länge angezogen. Diese Verlängerung würde ihren Zweck erreichen, wenn man die Füllung entsprechend vergrößern könnte. Da dies aber nicht möglich ist, so muß zu einer Erhöhung der Umdrehungszahlen gegriffen werden, so daß sehr hohe Endtemperaturen bei verhältnismäßig geringer Sättigung die Folge sind. Einen wirtschaftlichen Nutzen würde man nur dann gehabt haben, wenn gleichzeitig die Heizdampfspannung erniedrigt worden wäre.

Zur Erzielung der größten Leistung unter Wahrung möglicher Wirtschaftlichkeit ist es notwendig, daß Heizdampfspannung, Heizfläche und Menge des Trockengutes bezw. Zeit in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen, das durch Anlage- und Betriebskosten bedingt wird.

Da aber die Trockenanlage in Verbindung mit dem sonstigen Betrieb steht, muß auch dieser soweit als nötig mit in Betracht gezogen werden.

1. Die Dampfspannung.

Das Vorerwähnte gilt insbesondere von der Dampfspannung. Es ist nicht nötig, ausführlich zu begründen, daß als Heizmittel für die Trockenapparate lediglich gesättigter Dampf in Frage kommen kann. Ist es doch bekannt, welche großen Vorteile dadurch erzielt werden können, daß man den Dampf zunächst in Kraftmaschinen einen Teil seiner Wärme und Energie abgeben läßt, den Rest aber zu Heizzwecken verwendet.

Während man früher diesen Zusammenhängen wenig Beachtung schenkte, ist man sich ihrer Bedeutung jetzt bewußt geworden, da sich der Kraftbedarf infolge der zunehmenden Verdrängung der Handarbeit durch die Maschine auf dem produzierenden Werke selbst außerordentlich steigert und da ferner in den meisten Fällen Gelegenheit zum Absatz der erzeugten Energie in Form von Elektrizität gegeben ist. Schon jetzt geht die Entwicklung dahin, von vornherein den Brikettfabriken große Kraftwerke anzugliedern, um den Dampf vor seiner Verwendung in den Trockenapparaten möglichst auszunutzen und im übrigen den Vorteil des Wegfalls aller Frachtspesen für das Brennmaterial zu genießen. Und die Entwicklung kann weiter dahin führen, daß die Brikettfabriken schließlich zu Nebenbetrieben der Kraftwerke herabsinken. Die Elektrifizierung der mitteldeutschen Eisenbahnen steht, wie aus dem Preisausschreiben zur Erlangung von Entwürfen für hierzu geeignete Kraftzentralen hervorgeht, zur Erwägung, und eine günstigere Verknüpfung, wie die solcher Zentralen mit Brikettfabriken, würde sich kaum denken lassen. Dann wird es aber naheliegen, zugunsten des Kraftbetriebes den Gegendruck an der Maschine so klein wie möglich zu bemessen; das Maß hierfür sind die Mehrkosten infolge der geringeren Leistung der Trockenapparate und der etwaige Mehrverbrauch an Wärme infolge ungünstigerer Trocknung.

Die Entwicklung hat sich im allgemeinen umgekehrt vollzogen, als man es hätte erwarten sollen. Zu der Zeit, als man nur geringen Bedarf an Kraft hatte, trocknete man mit geringer Heizdampf-

spannung; jetzt, wo man mehr Kraft erzeugen muß, ist infolge höheren Gegendrucks weniger verfügbar.

Immerhin wird aber verschieden zu disponieren sein, je nach dem Maße, in dem Kraft verwendbar ist. Als Gegenpole erscheinen so die Anlage, bei der die Abdampfmenge nicht genügt und Frischdampf zugegeben werden muß, und die Anlage, bei der die Brikettfabrik Nebenbetrieb ist.

Man muß wissen, wieviel Kraft man durch eine Erniedrigung des Gegendruckes — es kommt nur eine Erniedrigung in Frage, da eine Erhöhung kaum mehr viel Zweck haben wird — gewinnen kann, und welche Mehranforderungen an Heizfläche damit verbunden sind.

Erst in neuerer Zeit hat man begonnen, dem Dampfverbrauch auch bei Gegendrücken über der atmosphärischen Spannung Beachtung zu schenken, nachdem man erkannt hatte, welche außerordentliche Wirtschaftlichkeit der Verwendung des Dampfes zu Kraftabgabe und Heizung innewohnt.

An erster Stelle muß hier Eberle genannt werden, der auf Grund von Versuchen in der „Zeitschrift des Bayerischen Dampfkesselrevisionsvereins“ und besonders in seiner Veröffentlichung in der „Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure“, 1907, S. 2005 ff., zuverlässiges Material an die Hand gab.

Weiter sind zu nennen die Abhandlungen von:

F. W. Foos, Der Dampfverbrauch von Brikettfabriken, „Braunkohle“, 1907, S. 667; aufgenommen in Franke, Handbuch der Brikettbereitung, S. 551;

Leuner, Über den indizierten Dampfverbrauch von Brikettpressen, „Braunkohle“, 1909, S. 1; zum Teil aufgenommen in Richter und Horn, Die mechanische Aufbereitung der Braunkohle, S. 118,

und in allerneuester Zeit:

Dr.-Ing. L. Schneider, Über die Verwertung des Zwischendampfes und des Abdampfes der Dampfmaschinen zur Heizzwecken, Berlin 1910.

Eberle hat den Einfluß wachsenden Gegendruckes an einer 40 pferdigen Maschine auf das genaueste untersucht und hierbei klare und übereinstimmende Resultate erhalten. Bei ihrer großen Wichtigkeit seien die wesentlichsten Ergebnisse, wenigstens soweit sie sich auf überhitzten Dampf beziehen, nachstehend aus der genannten Veröffentlichung wiederholt:

| Nummer des Versuches: | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|--|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Dampf Temperatur vor der Maschine | 257 ⁰ | 249 ⁰ | 260 ⁰ | 261 ⁰ | 258 ⁰ | 264 ⁰ | 276 ⁰ |
| Dampfdruck vor der Maschine Atm. abs. | 10 | 10 | 10 | 12 | 12 | 12 | 14 |
| Gegendruck Atm. abs. | 1,00 | 1,52 | 2,51 | 1,00 | 1,99 | 3,04 | 3,93 |
| Theoretische Füllung % | 16,3 | 20,1 | 29,2 | 11,5 | 17,8 | 24,4 | 24,5 |
| Dampfverbrauch auf 1 P. S. und Stunde kg | 7,74 | 8,59 | 10,25 | 7,69 | 9,18 | 10,79 | 11,29 |
| Exponent der Expansionskurve | 1,167 | 1,170 | 1,195 | 1,096 | 1,104 | 1,174 | 1,122 |
| Indizierter Gütegrad | 0,840 | 0,875 | 0,925 | 0,785 | 0,850 | 0,908 | 0,919 |
| Dampfzustand hinter der Maschine | Schwach überhitzt | | | | | | |

Die Versuche sind dergestalt ausgeführt, daß bei verschiedenem Gegendruck stets die gleiche Leistung der Maschine erzielt wurde, so daß also mit wachsendem Gegendruck immer größere Füllungen zur Anwendung kamen.

In diesem Zusammentreffen des an sich besseren Gütegrades bei größerer Füllung und den infolge des hohen Gegendruckes geringen Temperaturdifferenzen im Zylinder liegen die Ursachen für die außerordentlich günstigen indizierten Wirkungsgrade, zu denen übrigens auch der geringe schädliche Raum von 4 % beigetragen hat.

Eberle hat den indizierten Wirkungsgrad nicht in der sonst üblichen einfachen Art berechnet, daß er (vergl. „Hütte“, I, S. 341) die Arbeit der verlustfreien Maschine zu

$$AL = i - i_0'' + \Theta_0(s_0'' - s)$$

(s_0'' ist hier stets $> s$) einsetzt, sondern er hat die gleichfalls in der „Hütte“, II, S. 155, angegebene Berechnungsart gewählt, die den Vorteil größerer Bestimmtheit im Einzelfalle bietet und das Füllungs- bzw. Expansionsverhältnis zu berücksichtigen gestattet.

Wie die hier angegebenen Ergebnisse mit überhitztem Dampf, so wiesen auch die mit Sattdampf und Mantelheizung eine ganz erhebliche Steigerung der Gütegrade mit zunehmendem Gegendruck auf; und man kann annehmen, daß bei Sattdampf ohne Mantelheizung diese Steigerung noch erheblich größer sein wird, denn hier sind die Temperaturdifferenzen beim Eintritt und Austritt des Dampfes von noch viel größerem Einfluß auf die Wandungsverluste.

Durch die Verringerung von Eintritts- und Wandungsverlusten wird gleichzeitig der Exponent der Expansionspolytrope wesentlich verbessert, so daß er auch bei gesättigtem Dampf, höhere Gegendrucke vorausgesetzt, über dem Wert 1 liegt.

Die weiter genannten drei Autoren haben versucht, diese Verhältnisse dadurch zu klären, daß sie an der Hand von konstruierten oder der Praxis entnommenen Dampfdiagrammen die indizierte Arbeit und den Dampfverbrauch bestimmten; letzteren aus der sichtbaren Dampfmenge nach beendeter Füllung mit den Zuschlägen, die Hrabák für Abkühlungs- und Dampflässigkeitsverluste angibt.

Dies Verfahren erscheint bei Schneider angängig, der stets von dem normalen Verhältnis — allerdings mit von dem üblichen abweichendem Durchmesser des Niederdruckzylinders — unter Zugrundelegung bestimmter Abmessungen ausgehend zunächst hierfür die Dampfverbrauchszahlen ermittelt und erst weiter auf die Änderungen bei Zwischendampfentnahme schließt. Da Schneider ferner hochüberhitzten Dampf voraussetzt, so daß die Zusatzverluste gering sind, werden Fehler in diesen Annahmen keinen übermäßigen Einfluß auf das Resultat ausüben.

Dagegen ist es nicht zulässig, diese Berechnungsweise in der Art anzuwenden, wie es Foos und Leuner getan haben.

Die Hrabákschen Formeln sind empirisch entstanden durch Vergleichung des sichtbaren Nutzdampfverbrauches mit dem wirklichen. Daß sie nicht allen Verhältnissen gerecht werden, ergibt sich bereits daraus, daß man sich nicht mit den Dampfdiagrammen zur Beurteilung einer Maschine begnügt, sondern den wirklichen Dampfverbrauch ermittelt. Sie sind ferner auch nach Hrabák von den Kolbengeschwindigkeiten und der Besonderheit der Maschinengattung abhängig, können also immer nur mit diesen Verhältnissen zusammen verwertet werden. Insbesondere sind die Zahlen, welche sich auf Auspuffbetrieb beziehen, für den Gegendruck bei 1 Atm. ermittelt und können nicht auf höhere Gegendrucke einfach übertragen werden.

Denn hier liegen die Verhältnisse an sich thermisch viel günstiger, als bei Auspuff- und Vakuumbetrieb. Der Widerstreit zwischen möglichster Ausnutzung der Expansion und Verringerung der Wandungsverluste liegt hier nicht vor; die Expansionslinien verlaufen innerhalb dieser Druckstufen so steil, daß trotz Ausnutzung der Expansion noch große Füllungen erhalten werden.

Wenn man nun, wie Leuner, zunächst die Expansionspolytrope als gleichseitige Hyperbel konstruiert und ferner die Hrabákschen Verluste einsetzt, so begeht man einen Fehler, der mit zunehmendem Gegendruck immer höher wird.

So wird man diesen Berechnungen nur einen sehr bedingten Wert beimessen können.

Leuner geht nun noch einen Schritt weiter und berechnet aus seinen Diagrammen auch den Dampfzustand beim Austritt aus der Maschine.

Er beginnt seine Abhandlung mit der Schilderung des Dampfverbrauches einer Brikettpresse bei Drosselregulierung, wie sie auch bei Foos den Ausgangspunkt bildet. Nach Ergänzung der Arbeitsflächen des Diagrammes nach einem angenommenen besseren Verlauf vergleicht er den Nutzdampfverbrauch des alten und neuen Diagrammes und rechnet so eine Ersparnis von 2,2 kg pro Pferdestärke und Stunde aus, die durch die Kesselanlage mehr aufgebracht werden müßten. Zu diesem Schlusse konnte er kommen, da er Hrabáks Zusatzverluste annimmt, die schematisch in beiden Fällen gleich sind. Aber in Wirklichkeit wird durch die weitgehende Drosselung der Dampf überhitzt und ergibt geringere Abkühlungsverluste, so daß der wirkliche Dampfverbrauch sich hier mehr dem sogen. nutzbaren nähern wird. Und ebenso hat Foos den Hrabákschen Wert als Verlust zugeschlagen und kommt so zu ganz abnormen Dampfverbrauchszahlen.

Wenn nun Leuner weiter rechnet, daß die 2,2 kg Mehrverbrauch der Dampfkesselanlage zur Last fallen, so berücksichtigt er nicht, daß nicht die Wärmemenge, sondern lediglich die Energie des Dampfes unausgenutzt bleibt, daß also der Mehrverbrauch von Dampf sich im Endzustand des Dampfes als Mehrwert der Wärme wiederfinden muß, daß man den Begriff des thermischen Effektes auf diese Verhältnisse nicht übertragen kann. Berechnet man den sichtbaren Dampfgehalt am Ende der Expansion bei Leuner und Foos, so ersieht man, daß der Dampf überhitzt ausgetreten sein wird, während bei einer mit besserer Steuerung versehenen Maschine — Satttdampf vorausgesetzt — das jedenfalls nicht der Fall gewesen wäre. Dies ist aber überall dort, wo der Dampf zur Heizung verwendet wird, nicht unwesentlich. Während das in den Trocknern sich bildende Kondensat unter dem Gegendrucke der Apparate gehalten wird und deshalb seine Flüssigkeitswärme mit Ausnahme der Leitungsverluste beibehält, ist dies bei dem Kondensat, das sich in der Kraftmaschine und auf dem Wege zum Trockner bildet, nicht möglich. Es kann nicht unter dem Gegendrucke gehalten werden, um ein Rücktreten in die Maschine und Wasserschläge zu vermeiden, es wird ferner der bei Wasser schwierigen Entölung unterzogen werden müssen, so daß es in den meisten Fällen vollständig ungenutzt abfließen wird. Um diese Verluste zu vermeiden, wird man, wo angängig, den Endzustand des Dampfes an der Maschine so

bemessen, daß dieser gerade trocken gesättigt bei den Apparaten anlangt. Hierfür ist nun zweifellos der Endzustand günstiger, wie er sich bei den Pressen mit Drosselregulierung ergibt, und man wird diese so lange vorziehen können, als man nicht zu möglicher Kraftausnutzung gezwungen ist, vorausgesetzt natürlich, daß sich nicht auch gleichzeitig ein schlechter mechanischer Wirkungsgrad der alten Steuerung zugesellt, der überall schädlich wirkt.

Wenn vorhin gesagt wurde, daß Leuner den Endzustand des Dampfes aus den Diagrammen ermittelt habe, so ist das nur eine Vermutung. Leuner gibt nur die Versicherung, alles genau durchgerechnet zu haben, spricht sich aber über die befolgte Methode nicht aus. Berechnet man bei den beigegebenen Diagrammen den Endzustand unter Zugrundelegung seiner Dampfverbrauchszahlen aus dem sichtbaren Dampfinhalt am Ende der Expansion und nimmt weiter an, daß der Dampf mit gleichem Wärmehalt auf den Gegen- druck ohne weitere Arbeitsleistung expandiert, so kommt man meist zu wesentlich anderen Zahlen.

Wie aber Leuner weiter die Tabelle erhalten hat, in der er einfach einem Anfangszustand des Dampfes einen Endzustand gegenüber- setzt, entzieht sich jeder Nachprüfung. Man kann unmöglich glauben, daß in allen Fällen, wenn man — um ein Beispiel heraus- zugreifen — Dampf von 12,5 Atm. und 300° in eine Maschine mit 1,5 Atm. Gegendruck hineinsendet, dieser am anderen Ende wieder als 96,8 % gesättigter Dampf zum Vorschein kommt, ganz gleich, wie die Maschine beschaffen, welche Füllung gegeben und welcher Dampfverbrauch erzielt wird.

Da diese Tabelle auch in Richter und Horn, Die mechanische Aufbereitung usw., Aufnahme gefunden hat, schien es erforderlich, auf die Gefahren bei ihrer Benutzung hinzuweisen.

Nun entspricht es aber zweifellos einem Bedürfnis der Praxis, Anhaltspunkte über die mögliche Kraftausnutzung und den Endzustand des Dampfes zu besitzen. Alle solche Zahlen sind natürlich sehr bedingte, wie man auch bei der normalen Dampf- maschine nicht von vornherein damit rechnen kann, daß sämtliche Maschinen, wenn nur die Druckverhältnisse gleich sind, auch den gleichen Dampfverbrauch besitzen. Die Verhältnisse bei Gegendruck- maschinen liegen aber wesentlich einfacher, alle die komplizierten Vorkehrungen, um die Expansion des Dampfes möglichst auszunutzen, sind hier nicht nötig; große Füllungen sind allein schon deswegen geboten, um eine Expansion unter den Gegendruck zu verhüten, infolge des relativ geringen Dampfolumens am Ende macht der

Dampfauslaß keine Schwierigkeiten, und es bleibt als Hauptaufgabe des Konstrukteurs die Vermeidung von Drosselverlusten beim Eintritt und die Erzielung geringer schädlicher Räume übrig.

Man wird deshalb annehmen können, daß hier die Übertragung einmal ermittelter Dampfverbrauchszahlen mit geringeren Bedenken erfolgen kann. Hierfür eignen sich die Eberleschen Angaben besonders, da sie sehr genau durchgeführt sind, weil sie an einer kleinen Maschine gewonnen sind, so daß man bei Übertragung auf größere mindestens dieselben Resultate erwarten kann, und da ferner der Vergleich mit der verlustlosen Maschine und der kontinuierliche Verlauf der Gütegrade eine bequeme Interpolation zuläßt.

So ist in nebenstehender Tabelle die Umrechnung auf drei verschiedene Eintrittsspannungen von 14, 12 und 10 Atm. abs. erfolgt. Es ist überall als Temperatur vor der Maschine Überhitzung auf 300^0 angenommen: einmal, weil der Wärmehalt bei allen Spannungen dann annähernd gleich ist, dann auch, weil bei Neuanlagen, für deren Disposition ja derartige Anhaltspunkte besonders erwünscht sind, wohl in allen Fällen mit hochüberhitztem Dampf gerechnet werden kann. Diesen Eintrittsspannungen sind die Gegendrücke von 4, 3,5, 3, 2,5, 2 und 1,5 Atm. abs. bei 10, 20 und 30 % Füllung gegenübergestellt. Als Füllung ist die theoretische Füllung eingesetzt, als schädlicher Raum überall 5 % angenommen.

Für diese verschiedenen Fälle ist zunächst der Dampfverbrauch D_0 der verlustlosen Maschine nach dem von Eberle verwendeten Verfahren berechnet worden.

Aus dem von Eberle (a. a. O., S. 2013) gezeichneten Diagramm wurden die zugehörigen Gütegrade η_g entnommen bzw. extrapoliert und hieraus der indizierte Dampfverbrauch D_i ermittelt. Eine Unsicherheit besteht darin, daß Eberle die Leistung seiner Maschine konstant hielt und nicht durch Veränderung dieser auch den Einfluß verschiedener Füllungen bei gleichem Gegendruck untersucht hat. Wenn nun auch anzunehmen ist, daß der Gütegrad bei hoher Füllung besser ist als bei niedriger, so wäre es doch nur willkürlich gewesen, diesen Unterschied in irgend einer Form zum Ausdruck zu bringen. Es ist deshalb für die verschiedenen Füllungen stets derselbe indizierte Wirkungsgrad verwendet worden. Um eine Abschätzung zu ermöglichen, sind diejenigen Fälle, die den Verhältnissen der Versuche am nächsten kommen und die deshalb das meiste Vertrauen verdienen, fett gedruckt worden. Füllungen über 30 % sind nicht aufgenommen, da bei den Versuchen solche nicht verwendet wurden.

| Gegen- druck | abs. | Temperatur an der Maschine 300° | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------------|---------------------------------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|
| | | 14 Atm. | | | 12 Atm. | | | 10 Atm. | | |
| | | Fällung: | | | Fällung: | | | Fällung: | | |
| | | 10 % | 20 % | 30 % | 10 % | 20 % | 30 % | 10 % | 20 % | 30 % |
| 4 Atm. | D_0 | 22,1 | 11,1 | 9,3 | — | 14,0 | 11,5 | — | 22,4 | 14,6 |
| | η_g | 0,92 | 0,92 | 0,92 | — | 0,93 | 0,93 | — | 0,95 | 0,95 |
| | D_i | 25,0 | 12,1 | 10,1 | — | 15,1 | 12,4 | — | 23,6 | 15,4 |
| | W.E. auf 1 PSi und Stunde | 1815 | 877 | 732 | — | 1128 | 925 | — | 1780 | 1160 |
| | N_i | 547 | 1130 | 1350 | — | 906 | 1103 | — | 580 | 888 |
| 3,5 Atm. | D_0 | 14,5 | 9,1 | 9,0 | 23,6 | 11,4 | 10,1 | — | 15,4 | 12,1 |
| | η_g | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | — | 0,95 | 0,95 |
| | D_i | 16,1 | 10,1 | 10,0 | 25,7 | 12,4 | 11,0 | — | 16,2 | 12,8 |
| | W.E. auf 1 PSi und Stunde | 1190 | 750 | 742 | 1950 | 945 | 840 | — | 1250 | 990 |
| | N_i | 846 | 1347 | 1360 | 530 | 1100 | 1240 | — | 842 | 1062 |
| 3 Atm. | D_0 | 10,6 | 8,4 | 8,3 | 14,4 | 9,6 | 9,1 | 27,6 | 11,8 | 10,3 |
| | η_g | 0,87 | 0,87 | 0,87 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,95 | 0,95 | 0,95 |
| | D_i | 12,2 | 9,7 | 9,5 | 15,8 | 10,5 | 10,0 | 29,0 | 12,4 | 10,8 |
| | W.E. auf 1 PSi und Stunde | 926 | 737 | 721 | 1230 | 820 | 780 | 2290 | 980 | 854 |
| | N_i | 1100 | 1390 | 1420 | 870 | 1290 | 1350 | 470 | 1090 | 1250 |
| 2,5 Atm. | D_0 | 8,5 | 7,5 | 7,6 | 10,3 | 8,2 | 8,2 | 14,4 | 9,5 | 9,0 |
| | η_g | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,88 | 0,88 | 0,88 | 0,92 | 0,92 | 0,92 |
| | D_i | 10,0 | 8,8 | 8,9 | 11,7 | 9,3 | 9,3 | 15,7 | 10,3 | 9,8 |
| | W.E. auf 1 PSi und Stunde | 780 | 686 | 694 | 935 | 743 | 743 | 1270 | 833 | 794 |
| | N_i | 1340 | 1530 | 1500 | 1040 | 1440 | 1440 | 860 | 1300 | 1370 |
| 2 Atm. | D_0 | 7,1 | 6,8 | 7,1 | 8,0 | 7,3 | 7,5 | 9,7 | 8,0 | 8,0 |
| | η_g | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,91 | 0,91 | 0,91 |
| | D_i | 8,8 | 8,4 | 8,8 | 9,4 | 8,6 | 8,8 | 10,6 | 8,8 | 8,8 |
| | W.E. auf 1 PSi und Stunde | 711 | 680 | 711 | 780 | 713 | 730 | 891 | 740 | 740 |
| | N_i | 1510 | 1580 | 1510 | 1410 | 1550 | 1510 | 1250 | 1510 | 1510 |
| 1,5 Atm. | D_0 | 6,1 | 6,2 | 6,6 | 6,6 | 6,5 | 6,9 | 7,3 | 6,9 | 7,1 |
| | η_g | 0,78 | 0,78 | 0,78 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,87 | 0,87 | 0,87 |
| | D_i | 7,8 | 8,0 | 8,5 | 8,0 | 7,9 | 8,4 | 8,4 | 7,9 | 8,2 |
| | W.E. auf 1 PSi und Stunde | 653 | 670 | 713 | 687 | 678 | 721 | 730 | 687 | 714 |
| | N_i | 1690 | 1650 | 1550 | 1650 | 1670 | 1570 | 1570 | 1670 | 1600 |

Die Gütegrade für 14 Atm. Admissionsspannung sind rein extra-
poliert; sie werden deshalb bei besonders niedrigem Gegendruck
keinen besonderen Anspruch auf Genauigkeit machen können. Im
allgemeinen wird man weiter annehmen können, daß der Gütegrad
bei denselben Druckverhältnissen so lange konstant bleibt, als der

Dampfverbrauch der verlustlosen Maschine konstant ist, man wird deshalb auch einen Anhalt haben, innerhalb welcher Grenzen die Füllung ohne Änderung des Dampfverbrauches schwanken kann, was für die Bemessung der normalen Füllung wichtig ist.

Bei der Benutzung der Tabelle für Füllungen von 10 %, die praktisch wohl nur ausnahmsweise eintreten werden, ist die Schleifenbildung im Diagramm infolge Expansion unter den Gegendruck bei der Veranschlagung des mechanischen Wirkungsgrades zu berücksichtigen.

Interessant ist in der Zusammenstellung der Wechsel des Dampfverbrauches bei verschiedenen Füllungen. Während bei hohem Gegendruck niedrige Füllungen einen sehr vermehrten Dampfverbrauch aufweisen, stellt sich das Verhältnis bei niedrigem Gegendruck umgekehrt, und zwar tritt diese Änderung um so schneller ein, je höher die Eintrittsspannung ist.

Der Vergleich spricht sehr für den höheren Anfangsdruck, der bei seiner geringeren Entropie eine höhere Arbeit der verlustlosen Maschine zur Folge hat, die auch durch den geringeren Gütegrad nicht ausgeglichen wird.

Als Endzustand ist überall der trocken gesättigten Dampfes angenommen worden, da die geringen Übertemperaturen, die von Eberle festgestellt wurden, in der Wärmebilanz nicht besonders ins Gewicht fallen. Nur bei 14 Atm. Eintrittsspannung und 1,5 Atm. Gegendruck wird man zweifelhaft sein, ob hier der Abdampf nicht bereits naß ist.

Aus der Gegenüberstellung vom Wärmehalt des verbrauchten Dampfes beim Eintritt in die und Austritt aus der Maschine ergibt sich dann der Wärmeverbrauch auf die Pferdestärke. Er zeigt, welche ganz unvergleichliche Kraftquelle hier gegeben ist und wie nahe man dem Äquivalent der Pferdestärke 632 W.E. kommt.

Es ist weiter angenommen, daß zur Verdampfung von 1 kg Wasser im Trockner rund 700 W.E. verbraucht werden und Zwischenverluste nicht vorhanden sind, und es ist so die Kraftmenge berechnet, die auf je 10 000 kg stündlich im Trockner verdampftes Wasser verfügbar ist (N_1). Sind mehr oder weniger als 700 W.E. — beim Austritt aus der Maschine gemessen — zur Verdampfung erforderlich, so ändern sich die Zahlen entsprechend.

Die Leistungsfähigkeit des Dampfes für Kraftzwecke steigt nicht so stark, als man erwarten könnte, da im Trockner die Flüssigkeitswärme nicht ausgenutzt und deshalb bei niedrigerem Apparatdruck weniger Dampf verbraucht wird. Da gleichzeitig die

zur Herstellung einer PS_i erforderliche Wärmemenge sinkt, wird die Verringerung des Gegendruckes an sich immerhin Vorteile bieten.

Im allgemeinen kann man annehmen, daß bei den der Berechnung zu Grunde gelegten Dampfdrücken und 300^0 an der Maschine der Dampf um so höher überhitzt aus der Maschine austritt, je höher Gegendruck und Füllung sind; die Übertemperaturen haben aber auf die Leistung der Trockner keinerlei nachteiligen Einfluß. Selbst wenn der Dampf hochüberhitzt in den Trockner eintritt, kühlt er sich augenblicklich durch Mischung mit dem vorhandenen nassen Dampf auf die der Spannung entsprechende Temperatur ab.

Infolgedessen kann man in Fabriken, die mit Sattedampf arbeiten und Frischdampf zugeben, die Wirtschaftlichkeit durch Einführung eines höheren Gegendruckes an den Maschinen heben, da eine Erhöhung der Heizdampfspannung selbst, wenn man nicht die Füllung der Rohre entsprechend vergrößern kann, infolge der vergrößerten freien Spannung unwirtschaftlich wäre.

Da die Rohrleitungen in solchen Fällen bestehen, also ihre Weite nicht mehr verringert werden kann, empfiehlt es sich, unmittelbar hinter der Maschine eine Drosselung zur Erhöhung des Gegendruckes vorzunehmen. Es wird hierdurch der Dampf trockner, und es wird außerdem, da zur Erzielung der früheren Leistung mehr Dampf nötig ist, mehr Dampf durch die Rohre durchgeführt, was wiederum den Zwischenverlusten entgegenwirkt. Die Drosselung vor der Maschine wirkt in ähnlichem Sinne. Eine gute Dampfausnutzung in der Maschine ist in solchen Fällen also kein Vorteil.

Möglichste Vermeidung der Rohrleitungsverluste und Ausnutzung der Expansion bei geringen Wandungsverlusten haben zur Zentralisation der Krafterzeugung geführt.

Bei Gegendruckmaschinen sind aber, besonders bei der vorauszusetzenden Verwendung überhitzten Dampfes, die Eintritts- und Wandungsverluste an sich klein. Ihre Verringerung kann also keinen so weittragenden Einfluß haben wie bei der Kondensationsmaschine; insbesondere tritt hier auch der Gegensatz zwischen kleiner Auspuff- und großer Kondensationsmaschine überhaupt nicht auf.

Man wird also nicht dieselben Rücksichten auf die möglichste Vermeidung von Einzelmaschinen zu nehmen haben.

Das gilt besonders von den Brikettpressen, die immerhin schon eine beträchtliche Leistung entwickeln, und bei denen der indizierte Wirkungsgrad sich von dem größerer Maschinen wenig unterscheiden wird.

Der mechanische Wirkungsgrad wird aber keine besondere Verbesserung erfahren können, da auch bei elektrischem Antrieb die rotierende Bewegung wieder in die hin- und hergehende umgesetzt werden muß. Wenn nun außerdem die Motoren in einem Nebenraum stehen müssen und Riemenantrieb zwischengeschaltet wird, so ist eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit unwahrscheinlich. Hierzu kommen noch die hohen Kosten für die Tourenregulierung des Motors.

Auch an Leitungsverlusten dürfte nicht viel gebessert sein, da die Pressen sich in der Nähe der Trockner befinden, die Leitungen zum Trockner also, in denen eine Kondensation am wahrscheinlichsten ist, nur kurz sind, und diese Verluste, da sie sich in der Vorwärmung der Luft vor dem Eintritt in die Trockenapparate zum größten Teil wiederfinden, überhaupt nicht hoch veranschlagt werden können.

Das bisherige, insbesondere die Dampfverbrauchszahlen, bezog sich nur auf Kolbendampfmaschinen.

Denen gegenüber besitzen Dampfturbinen den Vorteil, daß sie ölfreies Kondensat liefern. Bei der Verwertung des Abdampfes zu Heizzwecken, wo die Kondensation in den Trocknern eintritt und das Kondensat in den Kessel zurückgeführt wird, kann dieser Vorteil beträchtlich scheinen. Immerhin dürfte er wohl überschätzt werden, wenigstens ist Verfasser kein Fall bekannt, wo beim Vorhandensein zweckentsprechender Entölungsvorrichtungen durch das Öl ernstere Schwierigkeiten hervorgerufen worden wären. Da diese Rückführung des Kondensats in die Kessel auf Brikettfabriken in jahrzehntelanger Übung steht, kann man sich auf diese Erfahrungen berufen. Von verschiedener Seite wird die nach einiger Betriebszeit zu beobachtende Verschlechterung des Wirkungsgrades im Trockner darauf zurückgeführt, daß die Rohre sich mit Öl bedecken und so eine Isolierschicht erhalten. Nun macht es aber bei der verhältnismäßig geringen Größe des Koeffizienten k_k wenig aus, wenn die Wärmeübertragung von Heizdampf auf die Rohrwand sich selbst in hohem Maße verschlechtert. Dagegen wird eine befriedigende Erklärung dadurch geboten, daß infolge des allmählichen Abschleifens der Innenwand die Kohle an den Wänden mehr gleitet und so weniger durcheinandergemischt wird, während sich gleichzeitig die auf Kohle wirkende Heizfläche verringert. Wenn man aber auf die Ölfreiheit besonderes Gewicht legt, so muß auch vollständige Zentralisierung der Krafterzeugung in der Turbine eintreten. Nicht die regelmäßige Zufuhr des Öls in die Kessel ist gefährlich, sondern unvermutete

Ansammlungen desselben, und solche können dann ebensogut erfolgen, wenn nur ein Teil Kolbenmaschinen in Betrieb steht.

Turbinen nützen nun nach E. Josse (Neuere Kraftanlagen, München und Berlin, 1909), vergl. auch Schneider (a. a. O., S. 71), das Spannungsgefälle nicht in dem Maße aus wie Kolbenmaschinen. Der Umstand, daß der Dampf infolgedessen stärker überhitzt austritt, würde nur dann in Ansehung der Zwischenverluste ein Vorteil sein, wenn ihm bei der Dampfmaschine nasser Dampf gegenüberstünde, was aber unter den Verhältnissen, unter denen die Turbine arbeiten würde, bei diesen auch nicht der Fall ist. Wenn es also darauf ankommt, aus dem Dampf vor seinem Eintritt in die Trockenapparate das möglichste an Energie herauszuholen, so wird man der Kolbenmaschine den Vorzug geben.

In neuerer Zeit ist die Zwischendampfturbine, auch Abzapfturbine genannt, öfters zur Aufstellung gelangt. Ihr Zweck ist vornehmlich, wechselndem Bedarf an Heizdampf zu genügen und entsprechend diesem eine Verteilung der Krafterzeugung auf Hoch- und Niederdruckstufe zu bewirken. Auf einer Brikettfabrik ist aber der Bedarf an Heizdampf konstant, während der Kraftbedarf schwankt. In der Abzapfturbine wird deshalb ständig der entsprechende Teil der Hochdruckstufe mit dem Heizdampf laufen, während der Rest des Kraftbedarfs teils von der Ober-, teils von der Niederdruckstufe geleistet wird. Es ist hier also dasselbe, als wenn man eine einfache Gegendruckturbine und eine normale Turbine auf dieselbe Welle gekuppelt hätte. Dies wird aber nur dann ein Vorteil sein, wenn die normale Turbine ständig entsprechend beaufschlagt ist, während sie in Wirklichkeit häufig nur die Spitzen aufnimmt und nachts überhaupt leer mitgeschleppt wird.

Mit abnehmender Belastung steigt der Dampfverbrauch der Turbinen ganz beträchtlich, während eine Überlastung bis zu einer gewissen Grenze günstig wirkt.

Es erscheint deshalb zweckmäßiger, die Trennung der Turbinen durchzuführen und neben einer selbständigen Gegendruckturbine für ständigen Betrieb zur Aushilfe eine normale aufzustellen, die nur im Bedarfsfalle in Betrieb gesetzt wird und nachts ruht. Die zu manchen Zeiten ungünstige Belastung dieser Maschine wird man allerdings nicht verhindern können.

Das gleiche gilt für Kolbendampfmaschinen; hier würde der Anschluß einer Niederdruckstufe, die dann oft leer mitgeschleppt werden müßte, noch ungünstiger wirken. Und es dürfte sich auch hier empfehlen, für den überschießenden Kraftbedarf eine besondere

Maschine aufzustellen, die dann je nach Wunsch und Bedürfnis ausgeführt werden könnte. Es scheint, als ob gerade für solche Zwecke, bei denen ein sehr wechselnder Dampfverbrauch vorauszusehen ist, die Gleichstromdampfmaschine mit Kondensation recht geeignet wäre, die auch in kleineren Ausführungen und bei hoher Expansion befriedigende Dampfverbrauchszahlen aufzuweisen hat. Die Übersichtlichkeit des Betriebes aber kann nur gewinnen, wenn ständig der eine Teil der Maschinen, unter ihnen die Pressen, mit Gegendruck, der andere Teil unter normalen Verhältnissen betrieben wird.

Für den Fall nun, daß man sich entschließen wollte, den Apparatedruck und damit den Gegendruck an den Dampfmaschinen zu erniedrigen, um für Krafterzeugung günstige Verhältnisse zu erhalten, ist die Frage wichtig, in welchem Maße die Kosten für die Trockenapparate wachsen werden. Man wird selbstverständlich dafür sorgen müssen, daß die Ersparnis in den Kosten bei der Krafterzeugung nicht durch Unwirtschaftlichkeit beim Trocknen wieder aufgehoben wird. Deshalb kann auch die Endtemperatur der Kohle nicht wesentlich herabgesetzt werden, da sonst sehr bald ein Mehrverbrauch an Wärme resultieren würde.

Es sei z. B. beabsichtigt, die Apparatespannung von 4 Atm. auf 1,5 Atm. abs. herabzusetzen, Form und Abmessungen der Trockner seien die üblichen.

Man wird danach streben, den Sättigungsverlauf entsprechend der geringeren Wärmezufuhr zu verbessern und deshalb lieber die Apparate langsamer laufen lassen, als weniger füllen. Unter dieser Annahme wird der Endzustand, 80° Temperatur der Kohle bei 74° Sättigung und 95° Wrasentemperatur, wie er auf der Sättigungskurve (Fig. 12) eingezeichnet ist, zu erreichen sein. Er enthält eine kleine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit gegenüber der in Fig. 12 wiederholten Kurve der Millygrube; man wird aber gut tun, von vornherein schärfere Anforderungen zu stellen. Rechnet man nun nach demselben Schema, wie S. 90 für Millygrube, die erforderliche Heizfläche nach, so findet man, daß bei Verwendung des durchgehenden Koeffizienten $k = 79$ eine Vermehrung von etwa 50%, bei Verwendung des Koeffizienten $k = 0,72(33 + t - t)$ eine Vermehrung von reichlich 70% erforderlich wird.

Das sind recht hohe Zahlen, die den tatsächlich erzielten Leistungen der Apparate bei niederem und höherem Gegendruck zu widersprechen scheinen. Dies ist aber nicht der Fall, denn sie beruhen auf der verlangten Wirtschaftlichkeit. Würde man die

Kohle mit 70° abführen, wie es früher üblich war, so würde die Leistung ganz beträchtlich steigen, die Wirtschaftlichkeit aber ebenso sinken.

Es ist eine Kalkulationsfrage, ob die höheren Anlagekosten eine derartige Maßnahme rechtfertigen; es dürfte das aber nur dann der Fall sein, wenn die Gestehungskosten der Rohkohle ausnahmsweise hohe sind.

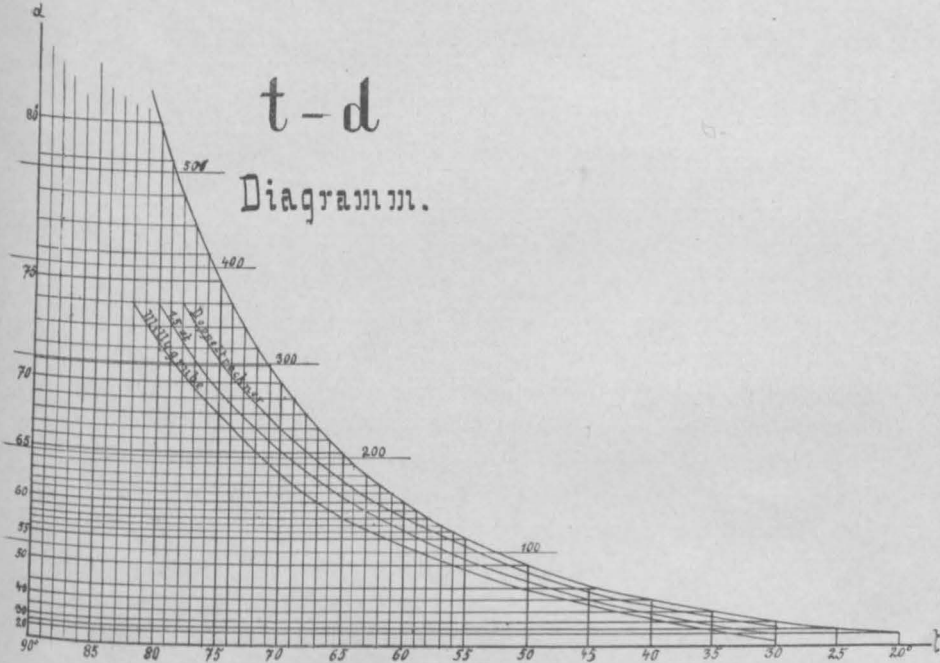


Fig. 12.

Außer den Verlusten, die mit dem Trockenvorgang selbst zusammenhängen, entstehen weiter solche durch die Mantelfläche des Trockenapparates, die gewöhnlich ungeschützt ist.

Diese Verluste sind weitaus geringer, als bisweilen angenommen wird. Wenn z. B. behauptet wird, daß auf Grube Ilse durch Isolierung des Mantels eine Ersparnis von 5 % erzielt sei, so müssen ganz ungewöhnliche Umstände dabei in Betracht gekommen sein, denn die vom Mantel ausgestrahlte Wärme kommt bei zweckentsprechender Luftzuführung, wenn die Luft zunächst die Pressen, dann Rohrleitungen, Trockenschnecken und zuletzt die Apparatmäntel bestreicht, der Trocknung wieder zugute. Als Verlust kann man allein die Wärmetransmission durch die Außenwände betrachten, die nicht allzu beträchtlich ist, wenn z. B. die Fenster auf dem Apparate-

boden ständig geschlossen gehalten werden. Die Ummantelung ändert an den Temperaturen der Umgebung wenig, wie vom Verfasser bei einer ausgeführten Ummantelung festgestellt wurde. Es ist deshalb zweckmäßiger, die Mantelfläche durch Vorwärmung der Luft auch zur Trocknung heranzuziehen.

2. Abmessungen der Apparate.

Stellt man nun weiter die Frage, mit welchen Mitteln unter Beibehaltung der allgemeinen Form der Röhrentrockner eine Erhöhung der Leistungen erzielt werden kann, so wird man nach dem vorangegangenen nicht im Zweifel sein, daß hierfür in Betracht kommen:

1. Erzielung möglichst hoher Sättigung der Luft, mit der eine Rückverlegung des Temperaturverlaufes in niedrigere Temperaturen verbunden ist.

2. Möglichste Ausnutzung der Heizfläche zur Wärmeübertragung auf Kohle, bei der mit einer über fünfmal so hohen Wärmedurchgangszahl gerechnet werden kann als gegen Luft.

Bei den jetzigen Abmessungen scheint es nicht möglich, erheblich weiter zu kommen, als es mit der Rolffschen Einblasevorrichtung geschehen ist.

Beide Bedingungen werden erfüllt durch Vergrößerung der Rohrweiten. Man kann ein weites Rohr mehr füllen als ein enges, da die Geschwindigkeit der Füllung von der freien Fallhöhe, gemessen von der Oberkante des Rohres aus, und dem gleichbleibenden Böschungswinkel abhängig, da ferner die Gefahr der Verstopfung geringer ist. Infolgedessen bereitet es auch keine Schwierigkeiten, das erforderliche Luftquantum durch das Rohr hindurchzuführen. Da weiter die Heizfläche nur mit dem Durchmesser, der Inhalt aber mit dessen Quadrat wächst, wird zugleich das Verhältnis des Inhaltes zur Heizfläche ein größeres, die Wärmezufuhr auf die Einheit von Gewicht und Zeit geringer, was die Vorbedingung einer höheren Sättigung ist. Gleichzeitig aber wird die zur Vollendung der Trocknung nötige Zeit wachsen.

Hieraus ergeben sich Schwierigkeiten, wenn man die Trocknung in einem Rohr zu Ende führen will. Einer entsprechenden Verlängerung würde sehr bald aus konstruktiven Gründen eine Grenze gesetzt sein, man wäre gezwungen, die nötige Zeit durch Verlangsamung der Umdrehungszahl zu gewinnen. Hierbei wird die Gefahr der Verstopfung wieder größer, es wird aber ferner die Mischung

der Gemengteile leiden. Da diese in der Hauptsache durch die Größe der Sehne s bedingt ist, proportional dem Durchmesser, während der Inhalt ja mit dessen Quadrat wächst, so würde man etwa annehmen können, daß bei doppeltem Inhalt die vierfache Umdrehungszahl der gleichen Mischungsgeschwindigkeit entsprechen würde; oder die doppelte Umdrehungszahl, wenn in das weitere Rohr zwei Paar Wendeleisten eingebaut werden. Durch entsprechende Verminderung des Neigungswinkels würde man aber wieder die Füllung schädigen und das Zurückfallen des Gutes aus den Rohren steigern.

Die einfache Vergrößerung des Rohrdurchmessers wird also ein etwas unsicheres Experiment sein, und man wird besser noch einen Schritt weiter gehen und eine Teilung des Trockenvorganges dergestalt eintreten lassen, daß man das Trockengut zwei solcher Rohre hintereinander durchlaufen läßt.

Zur Erreichung einer möglichst hohen Endsättigung muß die Luft im Gleichstrom mit der Kohle gleichfalls beide Trockner nacheinander durchlaufen; hinter dem ersten ist sie bereits einer Entstaubung zu unterwerfen.

Man kann mit dieser Anordnung noch folgende Zwecke verbinden:

1. Zwischenzerkleinerung und Abscheidung von Fremdkörpern sowie lignitischen Stücken. Auf die Wichtigkeit der geringen Korngröße, die namentlich gegen Ende des Trockenvorganges zur Geltung kommt, für Wärmeaufnahme, Verdampfungsgeschwindigkeit und Gleichmäßigkeit des Produktes ist bereits hingewiesen. Während der Zerkleinerung im Rohzustand Grenzen gesetzt sind, läßt sie sich leicht ausführen, wenn die Kohle etwa die Hälfte des Wassergehaltes verloren hat. Der Tellertrockner bietet das Beispiel hierfür; zwischen zwei Trockenapparaten läßt sich ein Walzwerk noch bequemer einschalten, da die empfindlichen Teile, Lager und Antrieb, außerhalb des warmen und staubigen Raumes untergebracht werden können.

2. Absonderung des feinen Staubes am Ende des ersten Apparates zum Schutz vor Übertrocknung und Überhitzung.

Die neueren Entstauber, vorzugsweise das System Michaelis, lassen sich in so unmittelbarer Nähe der Apparate anbringen, daß ein Schutz gegen Kondensation des Wrasens kaum erforderlich, sonst aber leicht anzubringen ist. Da es schließlich gleich ist, ob man mit dem Exhaustor, der schon wegen des feinen Staubes vorhanden sein muß, mehr oder weniger Staub absaugt, wird man ihn

zugleich zur Sichtung des Mahlgutes verwenden, indem man sein Saugrohr etwa bis über das Walzwerk herabführt und eventuell noch eine Rüttelvorrichtung oder eine kurze Strecke freien Falles an das Walzwerk anschließt. Dieser so bei niederen Temperaturen, etwa 63 °, abgesonderte Staub ist getrennt von der sonstigen Kohle, wozu ja auch die bergpolizeilichen Bestimmungen nötigen, abzuführen und erst kurz vor der Presse wieder zuzumischen. Wie die Erfahrungen bei Teller Trocknern lehren, bereitet solcher Staub der Innenentstaubung nicht die Schwierigkeiten, wie der übertrocknete. Da weiter die Nachwalzwerke in Wegfall kommen, so wird die Innenentstaubung wesentlich erleichtert, die an sich deshalb schwieriger ist als die Schlotentstaubung, weil bei ihr keine Unterstützung in der Staubabscheidung durch kondensierenden Wrasen eintritt. Mit der Abführung der Hauptmenge des Staubes vor dem zweiten Trockner tritt für den Endentstauber gleichzeitig eine wesentliche Entlastung ein.

3. Berücksichtigung der Volumenverminderung des Trockengutes.

Die mit der beim Trocknen eintretenden Schwindung der Kohle verbundene Verringerung der Heizfläche ist beträchtlich; sie beträgt bei Millygrube (S. 41) am Ende 16 % weniger gegenüber dem Eintrittsbogen.

Um so viel verschlechtert sich auch die Wärmeaufnahme am Ende, wo gerade die Wärmeübergangszahl an sich schon schlecht ist. Die Vermeidung dieser Volumverringerung würde gegen 5 % Mehrleistung zur Folge haben. Man wird wohl annehmen können, daß dies Schwinden sich während des Mahlens vollziehen wird und die bereits entstandenen Risse die Stellen des Bruches bilden. Auf jeden Fall könnte man der Berechnung des zweiten Apparates den Endzustand zugrunde legen und im Anfang etwas mehr Füllung geben.

Für die Ermittlung der Dimensionen käme folgendes in Betracht:

Es können nicht dieselben festen Maße in allen Fällen angewendet werden, vielmehr müssen sie sich je nach dem gewählten Gegendruck ändern. Von den Apparatlängen von 7 m, die sich konstruktiv bewährt haben, wird man nicht gern abweichen und lieber Rohrweite und Füllung dem gewünschten Druck anpassen.

Durch die gleichbleibende Apparatlänge ist auch ein Vergleich mit der Wirkung der jetzt üblichen Trockner erleichtert, deren Verhältnisse man so einfach übertragen kann.

So soll der nächstliegende Fall untersucht werden, daß die absolute Heißdampfspannung 4 Atm. ist und Kohle von Millygrube verwendet wird.

Wenn die Kohle statt eines Weges von 7 m einen solchen von 14 m zurücklegen soll, so ist auf die Einheit der Zeit oder des Weges nur die Hälfte der Wärme zuzuführen.

Infolgedessen vermindert sich die freie Spannung mindestens auf die Hälfte, die Luft wird stärker gesättigt und die Temperaturen gehen zurück. Nimmt man nun wieder gleiche Wirtschaftlichkeit zum Ziel, so wird die Endtemperatur der Kohle auf 78° zurückgehen können, während der Taupunkt mit 74° derselbe bleibt. Ebenso wird man annehmen können, daß sich die Temperatur der abziehenden Luft auf 95° vermindert. Diese Annahmen sind zweifellos zu ungünstig, da allein schon infolge der Zwischenzerkleinerung die Verdampfungsgeschwindigkeit mindestens auf das Doppelte steigen wird.

Die entsprechende Sättigungskurve ist in Fig. 12 aufgezeichnet und aus ihr, ebenso wie im Schema S. 90, die Temperaturkurve (Fig. 11) berechnet, wobei dieselbe Schwindung angenommen wurde wie dort. Es ergab sich eine Verkürzung des Weges oder eine Ersparnis an Heizfläche von etwa 5 %. Berücksichtigt man weiter die Beseitigung des Schwindungsverlustes, so kommt man auf eine Mehrleistung von 10 %, immer die Verhältnisse der ursprünglichen Rohrweite vorausgesetzt.

In dem zu wählenden Rohrdurchmesser müßte das Verhältnis des Querschnittes der Kohle zur kohleberührten Bogenlänge das Zweifache sein wie beim normalen Apparat, und unter Berücksichtigung der Mehrleistung infolge der höheren Sättigung das 2,2 fache.

Da auf Millygrube einer Bogenlänge von 1 cm $\frac{15,15}{10,3} \sim 1,5$ qcm Querschnitt der Kohle entsprechen, müßte also hier auf 1 cm Bogenlänge 3,3 qcm Kohle kommen. Bei 13 cm Rohrdurchmesser würde das Verhältnis gerade erfüllt sein, wenn das Rohr zur Hälfte gefüllt ist.

Umstehend ist die Berechnung unter dieser Voraussetzung und unter der Annahme erfolgt, daß die Querschnitts- und Flächenverhältnisse über den ganzen Vorgang gleich bleiben:

$$s = 13 \text{ cm}, \quad b = 20,4 \text{ cm}, \quad 2 \pi r - b = 20,4 \text{ cm}.$$

| t | θ | d | x | Wärmeinhalt | | | Differenz | $\tau - t$ Mittel | $b(\tau - t)^{79}$ | $b(\tau - t) \cdot 0,72$ (33 + $\tau - t$) | $1 + 10 \sqrt[10]{v}$ | $\tau - \theta$ (Mittel) | $\frac{Q_l}{l}$ | $\frac{Q_s}{l}$ |
|-----|----------|-----|-------|-------------|-----------------------|-------|-----------|----------------------|--------------------|--|-----------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|
| | | | | der Luft | des Trocken- gutes | Summa | | | | | | | | |
| 10 | 30 | 7 | 0 | 1100 | 230 | 1330 | 1910 | 123 | 1980 | 2815 | 21 | 103 | 442 | 104 |
| 30 | 50 | 24 | 0,025 | 2390 | 650 | 3240 | 2150 | 108 | 1740 | 2235 | 22 | 87 | 395 | 98 |
| 40 | 62 | 51 | 0,064 | 4580 | 810 | 5390 | 2040 | 98 | 1580 | 1890 | 22 | 77 | 333 | 90 |
| 50 | 70 | 78 | 0,102 | 6480 | 950 | 7430 | 1970 | 90 | 1450 | 1625 | 23 | 70 | 326 | 85 |
| 55 | 76 | 108 | 0,144 | 8440 | 960 | 9400 | 1710 | 85 | 1370 | 1470 | 23 | 65 | 308 | 81 |
| 60 | 81 | 138 | 0,189 | 10150 | 960 | 11100 | 2850 | 80 | 1290 | 1445 | 24 | 60 | 300 | 77 |
| 65 | 85 | 176 | 0,244 | 13000 | 960 | 13960 | 3080 | 75 | 1210 | 1188 | 25 | 56 | 292 | 73 |
| 70 | 89 | 227 | 0,318 | 16230 | 810 | 17040 | 4610 | 70 | 1130 | 1057 | 27 | 52 | 285 | 69 |
| 75 | 93 | 300 | 0,424 | 21050 | 600 | 21650 | 3450 | 66 | 1060 | 957 | 28 | 49 | 266 | 64 |
| 78 | 95 | 359 | 0,510 | 24710 | 390 | 25100 | | | | | | | | |

Man erhält hierdurch die Bestätigung der ersten Annahme und errechnet, daß die Gesamtlänge bei Annahme des Koeffizienten $k_k = 0,72(33 + \tau - t)$ sich auf 13,5 m, bei $k_k = 79$ auf 14,02 m stellt. In Fig. 11 ist der Temperaturverlauf eingezeichnet.

Die Länge der Heizrohre mit 14 m ist also reichlich, man wird unter Umständen dementsprechend die Trommel bei gleicher Füllung noch etwas schneller laufen lassen können und damit eine weitere Erhöhung der Leistung erzielen können; auch die Sättigungskurve ist ja so vorsichtig bemessen, daß die geringe Tourenänderung daran nichts ändern wird.

Ein Vergleich der Doppeltrockner mit dem normalen Apparat und dem mit Rolffscher Einblasevorrichtung versehenen zeigt folgende Verhältnisse:

| Auf 1 qm Heizfläche kommen: | Millygrube | Lauchhammer | Doppeltrockner |
|---|------------|-------------|----------------|
| Übertragene Wärmeeinheiten pro Stunde | 2700 | 3230 | 4150 |
| Im Vergleich | 100 | 119 | 153 |
| Trockenkohle kg | 3,76 | 4,35 | 6,00 |
| Verdampftes Wasser kg | 3,86 | 4,62 | 6,10 |
| Im Vergleich | 100 | 123 | 162 |
| Auf 1 kg verdampftes Wasser sind im Apparat verbraucht W.E. | 700 | 700 | 680 |

Die Leistung hat eine sehr erhebliche Zunahme erfahren: gegenüber dem Ausgangspunkt, Millygrube, um 60 %. Nicht so stark ist die Wärmeabgabe gestiegen, was eine Folge der größeren Wirtschaftlichkeit des Endzustandes ist. Die Leistung würde sich um weitere 3,5 % erhöhen, wenn in Wirklichkeit eine Länge von 13,5 m statt der angenommenen 14 m genügen würde.

Anders wäre zu verfahren, wenn Dampf mit geringerer, z. B. 1,5 Atm. Spannung zur Verwendung kommen soll. Entsprechend der geringeren Wärmeübertragung müßte entweder eine Verlängerung der Apparate oder eine Verminderung der Umdrehungszahlen bzw. eine Kombination eintreten. Dann aber würde es vorteilhafter sein, die Teilung noch weiter zu treiben und drei Apparate hintereinander zu verwenden, womit eine abermalige Erhöhung der Rohrweiten und Ausnutzung von mehr als der Hälfte der Heizfläche zur Wärmeabgabe an die Kohle verbunden werden könnte.

Allerdings würden damit erhebliche Schwierigkeiten in der Luftführung entstehen, da dann die sämtlichen drei Apparaten entsprechende Luftmenge durch jedes Rohr getrieben werden müßte.

Bei einer Zweiteilung ist die Luftmenge noch nicht so groß, daß sie zu Bedenken Anlaß geben könnte. Am Ende der ersten Trommel wird die Temperatur der Kohle etwa 63 ° sein, die der Luft etwa 81 ° und der Taupunkt 60,7 °; ein Rohr braucht stündlich 100 kg Luft. Daraus ergeben sich folgende Volumina und Geschwindigkeiten:

| | Volumina: | Geschwindigkeit: |
|----------------------------|-----------|------------------|
| Beim Eintritt in die erste | | |
| Trommel | 86,5 cbm | 3,6 m |
| am Ende der ersten Trommel | 126 cbm | 5,3 " |
| " " " zweiten " | 163 " | 6,9 " |

Diese Geschwindigkeiten sind wesentlich höher als die jetzt üblichen. Sie werden aber keinen Nachteil bedeuten, denn am Schlusse des ersten Apparates wird ja gerade die Entfernung des feinen Staubes beabsichtigt, so daß die höhere Luftgeschwindigkeit unterstützend eingreift; am Ende des zweiten Apparates ist es aber leicht, Strecken geringerer Geschwindigkeit vor dem Entstauber einzuschalten, wenn man überhaupt Bedenken trägt, dem Entstauber größere Mengen Staub zuzuführen.

Für die Leistung des Trockners ist die größere Geschwindigkeit der Luft nur günstig. Die infolgedessen mehr aufgenommene Wärme kann an die Kohle abgegeben werden, da die Berührungsfläche annähernd in demselben Verhältnis steigt, wie die Wärme-

aufnahme der Luft, während andererseits wahrscheinlich ist, daß sich die Wärmeabgabe der Luft an die Kohle gleichfalls mit der Geschwindigkeit vergrößert. Man kann also annehmen, daß die Luft mit einer geringeren Temperatur austreten wird, was in der Berechnung nur in sehr geringem Maße zum Ausdruck gebracht worden ist, da der Temperaturerniedrigung der Kohle um 4° nur eine solche der Luft um 5° gegenübergestellt wurde. Aber auch für die Verdampfungsgeschwindigkeit selbst ist die größere Luftgeschwindigkeit ein Vorteil, da zunächst ein besseres Absaugen der den einzelnen Körnchen adhärierenden gesättigten Luftschichten stattfindet, und da

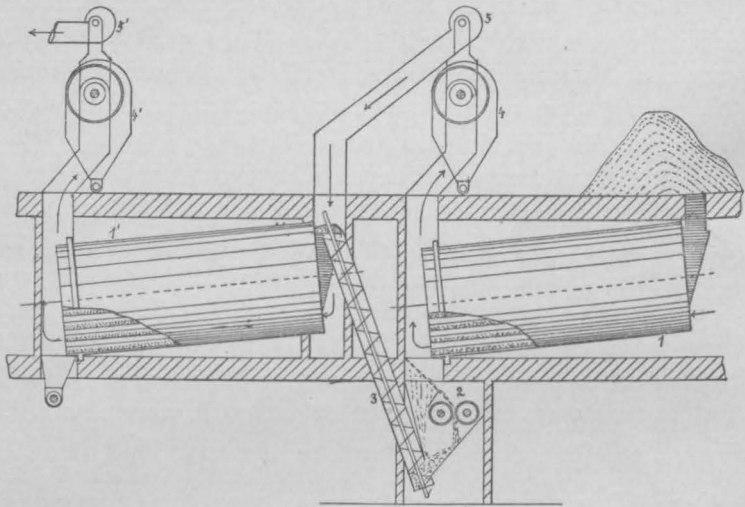


Fig. 13.

ferner infolge der wachsenden Reibungswiderstände ein Durcheinanderwirbeln und Mischen der Luftteilchen bewirkt wird. Man kann aber auch eine weitgehende Herabminderung der Luftgeschwindigkeit eintreten lassen, wenn man nicht sämtliche Abluft des ersten Trockners dem zweiten zuführt, sondern nur einen Teil, und diesen mit frischer, vorgewärmter Luft mischt. Auch die Wirtschaftlichkeit braucht unter einer solchen Maßnahme nicht zu leiden.

Eine solche Doppeltrockneranlage ist in Fig. 13 schematisch dargestellt. Trockengut und Luft passieren zunächst den Trockner 1, an dessen Ende die Kohle im Walzwerk 2 zerkleinert wird, während der Wrasen dem Entstauber 4 (es ist Entstaubung System Michaelis angedeutet) unter der Einwirkung des Exhaustors 5 zugeführt wird, um gereinigt wieder in Trommel 1' einzutreten. Hierher wird auch die gemahlene Kohle durch irgendwelches Transportmittel befördert.

Zweckmäßig wäre es vielleicht, das Austrittsende des ersten und Eintrittsende des zweiten Apparates als Heberad auszubilden.

Nachdem auch die zweite Trommel 1' gemeinsam durchlaufen ist, fällt die getrocknete Kohle in die Hauptschnecke, während der Wrasen durch Entstauber 4' und Ventilator 5' ins Freie entlassen wird.

An Stelle dieser Anordnung kann man auch den ersten Trockner über dem zweiten anordnen und das Gut den Zwischenweg lediglich unter dem Einfluß der Schwere zurücklegen lassen. Die Anlagekosten der Gebäude werden hierdurch beträchtlich vermindert werden.

Der Luftabschluß zwischen beiden Trocknern kann durch ein rotierendes Zellenrad oder wechselweise sich öffnende und schließende Schieber, bekannte Konstruktionen, bewirkt werden. Auf eine absolute Dichte dieser Organe kommt es nicht an, da die Luft vor und hinter ihnen dieselbe Beschaffenheit besitzt und die erste Entstaubung überhaupt weggelassen werden könnte, wenn nicht die Entfernung des Staubes wünschenswert wäre.

Wie aus der Skizze ersichtlich, kommen neue Einrichtungen, deren Wirksamkeit Zweifeln unterliegen könnte, nicht in Betracht; gegenüber dem üblichen Verfahren würden lediglich folgende Unterschiede eintreten:

Die Einfüllvorrichtung vor dem ersten Apparat muß reichlich das Doppelte leisten als bisher. Dagegen vollzieht sich das Einfallen in die weiten Rohre bedeutend leichter, besonders, wenn es durch eine Einblasevorrichtung unterstützt wird. Die in den Zuführungslutten nunmehr eintretende schnellere Bewegung der Rohkohle wird ein Festsetzen unter dem Gewichte der darauf lastenden Kohlensäule weniger wahrscheinlich machen als jetzt. Daß das staubförmige Material beim Einfüllen in den zweiten Apparat Schwierigkeiten machen sollte, scheint ausgeschlossen.

Die Kapselung der Eintrittsseite an den zweiten Apparaten ist keine Neuheit, sondern bereits in Verbindung mit der Foosschen Luftvorwärmung am Apparatemantel zur Einführung gekommen, ohne daß sie zu Störungen Anlaß gegeben hätte.

Die Sättigungskurve ist ziemlich vorsichtig angenommen worden, und es ist deshalb nicht sehr wahrscheinlich, daß dieser Verlauf unterschritten wird. Eher wäre es möglich, daß die Sättigung zu hoch ausfällt.

Dies könnte insbesondere zwischen dem ersten und zweiten Apparat unangenehm werden, da mit dieser Umföhrung von Luft und Trockengut eine Abkühlung verbunden ist.

An sich kann eine solche Abkühlung nur geringe Bedeutung haben und wird unter 1 % des Gesamtwärmeverbrauchs bleiben, wenn nur Kondensationen vermieden werden.

Die bei Zwischenschaltung des Mannschen Walzwerkes in den Tellertrocknern entstehende starke Abkühlung hat ihren Grund darin, daß zugleich mit der Zerkleinerung, die eine beträchtliche Steigerung der Verdampfungsgeschwindigkeit bewirkt, frische Luft zugeführt wird, und daß diese Zufuhr sich auf den unteren Tellern wiederholt. Aus der oft erwähnten Hauptformel geht aber hervor, daß eine feste Verknüpfung zwischen Verdampfungsgeschwindigkeit, Temperatur und Sättigung besteht, daß die frühere Temperatur nicht eher wieder erreicht werden kann, als dieselbe, und infolge der Erhöhung der Verdampfungsgeschwindigkeit durch die Zwischenzerkleinerung eine höhere, Sättigung der Luft erzielt ist. Der Ausgleich wird dadurch geschaffen, daß $\frac{dt}{dz}$ negativ wird; infolge der geringen Wärmekapazität der Kohle muß diese Temperaturerniedrigung eine schnelle und erhebliche sein.

Hier dagegen tritt eine Zuführung frischer Luft nicht ein, sondern die Kohle verbleibt ständig mit Ausnahme des geringen Zwischentransportes in der wärmeren Luft mit gleichmäßigem Taupunkt, ihre Temperatur wird also nicht unter den Taupunkt sinken können. Eine Abkühlung der Luft selbst unter den Taupunkt scheint ausgeschlossen.

Sollte dieser Fall aber dennoch eintreten, so wäre Abhilfe leicht zu schaffen, wenn man — am besten unterhalb des Walzwerkes — eine kleine Menge trockner und vorgewärmter Luft einführen würde, die dann durch gleichzeitige Erwärmung und Verdünnung solche Störungen ausschließen dürfte. Es ist immerhin billiger, diese Wärmemenge durch einfache Rippenheizkörper als durch die teuren Röhrentrockner zu erzeugen.

Das gleiche könnte am Ende des zweiten Röhrentrockners geschehen, wenngleich hier übermäßige Sättigung weniger wahrscheinlich ist als bei der durch die Zerkleinerung hervorgerufenen plötzlichen Steigerung der Verdampfungsgeschwindigkeit.

Eine Erhöhung der Gefährlichkeit des Betriebes wird durch die Zerteilung nicht geschaffen. Sie bietet vielmehr den Vorteil, daß durch die geringere freie Spannung und die zeitige Entfernung des feinen Staubes die Explosionsmöglichkeit verringert wird. Feuer im Apparat, das in der Hauptsache auf eingetretene Verstopfungen zurückzuführen ist, wird weniger leicht eintreten, weil

die Rohre weiter sind, und wenn doch, dann nur im ersten Trockner, so daß durch Stillsetzen auch des zweiten das Feuer zuverlässig an weiterem Vordringen entlang der Hauptkohlschnecke gehindert werden kann.

Es würde die Frage zu erörtern sein, in welchem Verhältnis die mit der Änderung verbundenen Kosten zu der Vergrößerung der Leistung stehen.

Berechnet man die Wandstärke der Rohre nach einer der üblichen Formeln, so erkennt man, daß weniger der Außendruck bestimmend gewirkt hat, als Bieungsbeanspruchung und Knickungsgefahr. Bei beiden ist das Widerstandsmoment ausschlaggebend, das bei 3 mm Wandstärke und 130 mm Durchmesser das 1,8 fache des Rohres von 95 mm lichtigem Durchmesser beträgt, während das Bieungsmoment nur auf das 1,7 fache anwächst. Es scheint also eine Vergrößerung der Wandstärke nicht erforderlich zu sein; durch einen leicht anzustellenden Versuch wird man sich davon überzeugen können, ob diese Annahme zutreffend ist. Hierbei ist allerdings angenommen, daß von den handelsüblichen Abmessungen abweichende Wandstärken erhältlich sind.

Dagegen würde, wenigstens wenn man dieselbe Heizfläche in einer Trommel unterbringen wollte, eine Verstärkung der Böden eintreten müssen, und ebenso der Welle und Lager. Da die Welle gleichzeitig zur Zuführung des Dampfes dient und der hierfür erforderliche Querschnitt infolge des größeren Dampfverbrauches gleichfalls eine Erhöhung erfahren muß, wird sich das erforderliche größere Widerstandsmoment von selbst einstellen. Dagegen ist bei gleicher Heizfläche nur Dreiviertel der Rohrzahl einzuwalzen.

Die Zahl der Entstaubungen und Exhaustoren würde verringert, ihre Leistung müßte gesteigert werden, so daß ungefähr ein Ausgleich eintreten wird. Die Anbringung der Walzwerke, es würde auf etwa drei Apparate gewöhnlicher Bauart eins entfallen, dürfte nicht allzusehr ins Gewicht fallen.

Es würden aber, wenn man die Anordnung der Trockner übereinander zugrunde legt, wesentliche Ersparnisse in den Anlagekosten der Gebäude und Transmissionen eintreten, da die Grundfläche der Trocknerei dann auf ungefähr ein Drittel zusammenschrumpfen würde.

3. Rückgewinnung von Wärme.

Selbst wenn man recht günstige Verhältnisse annimmt, wird man bei dem jetzt üblichen Schultztrockner ohne Verringerung der

Leistung die Verdampfung von 1 kg Wasser mit nicht viel weniger als 700 W.E. bewerkstelligen können, also einen Verlust von rund 18 % gegenüber den theoretisch erforderlichen 590 W.E. in den Kauf nehmen müssen. Und auch beim Doppeltrockner wird man, um Schwierigkeiten infolge vorzeitiger Kondensierung des Wrasens aus dem Wege zu gehen, den Wärmeverbrauch nicht unter 675 W.E. bzw. 14 % Verlust herunterdrücken können.

Diese Verluste bestehen zum Teil in der Abwärme des Trockengutes, in der Hauptsache aber aus der mit Luft und Wasserdämpfen ins Freie abgeführten Wärmemenge.

Geringere Endtemperatur allein kann eine Besserung nicht bringen, da zwar der spezifische Wärmeinhalt der Abluft sinkt, dafür aber ihre Menge in unverhältnismäßig höherem Grade steigt.

Ein Vorteil ist mit niedrigeren Temperaturen also nur dann verbunden, wenn gleichzeitig die Luftmenge selbst vermindert wird. Hierauf beruhen die immer wiederholten Vorschläge, die Trocknung im Vakuum vorzunehmen. Da zudem die Verdampfungsgeschwindigkeit (vergl. S. 63) umgekehrt proportional dem Luftdruck ist, würde auch bei niederen Endtemperaturen eine Verringerung derselben nicht eintreten, während die Wärmeübertragung durch die niedrige Temperatur gefördert wird.

Dagegen ergeben sich Schwierigkeiten insofern, als die freie Spannung und damit die Sättigung der Luft nur dann günstig ist, wenn die ganze Menge des Trockengutes eine möglichst gleichmäßige Temperatur besitzt. Bei Flüssigkeiten regelt sich diese von selbst durch Mischung infolge der veränderten spezifischen Gewichte, bei Gemengen tritt ein solcher Ausgleich nicht ein.

Würde man also z. B. die Rohkohle in große dampfgeheizte Kessel einfüllen und hier ruhend erwärmen, so würde die freie Spannung eine beträchtliche Höhe annehmen und zu einer sehr geringen Ausnutzung der Luftpumpenarbeit führen. Man ist also gezwungen, auf eine möglichst gute Mischung bedacht zu sein. Eine rotierende Trommel kann man nur verhältnismäßig wenig füllen und wird lieber einen feststehenden Behälter und Rührvorrichtungen anwenden. Mit den dann erforderlichen Wellen, die irgendwie durch die Behälterwand durchzuführen sind, werden aber zugleich die Schwierigkeiten vermehrt, den Raum luftfrei zu halten. Es ist bekannt, wie schädlich die gleichzeitige Anwesenheit von Luft für die Erzielung eines guten Vakuums ist. Hier wird zunächst mit der Kohle selbst eine große Menge Luft in den Trockner eingeführt; um so mehr, je geringer die Füllung mit Rücksicht auf die Mischung

gehalten wird, und es ist deshalb nötig, daß während des Trocknens selbst und besonders bei dessen Ende jede Luftzufuhr verhindert wird. Aus diesem Grunde ist es auch kaum möglich, einen kontinuierlichen Betrieb durchzuführen. Man wird eine Menge kleiner Apparate erhalten, deren Bedienung die Ersparnisse wohl wieder illusorisch machen wird, die trotz der hohen Anlagekosten und der nicht zu unterschätzenden Luftpumpenarbeit etwa gemacht werden könnten.

Eine andere Art der Trocknung, an die man hier denken könnte, besteht darin, daß die Trocknung in einem geschlossenen Raume vor sich geht und die gebildeten Dämpfe erst bei einer die atmosphärische etwas übersteigenden Spannung zum Austritt gelangen. Die Heizung kann entweder durch geheizte Flächen oder durch Einführung von Dampf geschehen.

Hiermit würden zweifellos bedeutende Vorteile erzielt werden können, der Einführung stehen aber die hohen Temperaturen entgegen, die eine Zersetzung der Kohle herbeiführen können, während der Staub nach seinem Austritt aus dem Trocknungsapparat sehr reaktionsfähig und explosionsgefährlich sein wird.

Allen solchen Bestrebungen wird man deshalb von vornherein eine günstige Prognose nicht stellen können und wird deshalb besser versuchen, die Wärme des Endzustandes zur Rückgewinnung von Wärme auszunutzen. Zwar sind es große Wärmemengen, die ungenutzt zum Schlot entweichen, aber ihr Wert ist infolge der geringen Übertemperatur gegenüber der Umgebung nur ein geringer; eine Verwendung zur Krafterzeugung ist von vornherein ausgeschlossen und nur eine solche zur Heizung möglich.

Eine Wiedergewinnung von Wärme aus der abgehenden Trockenkohle findet schon jetzt durch die Nachverdampfung statt. Die Rücksicht auf die Güte der erzeugten Briketts zwingt dazu, die Kohle vor ihrer Verpressung auf niedrigere Temperaturen herabzukühlen und während des Durchlaufens durch die langen Transportschnecken und die Kühlräume tritt zugleich eine Nachverdampfung ein. Die Höhe dieser Nachverdampfung ist nur recht schwer festzustellen, einmal, weil der Trockengrad selbst in erheblichem Maße wechselt und eine Bezugnahme auf den einzelnen Trockenapparat nicht möglich ist, dann auch wegen der Schwierigkeiten, die die Bestimmung des Trockengrades noch heißer Kohle überhaupt verursacht. Verfasser konnte selbst bei hoher Endtemperatur der Kohle (96 bis 98 °) und guter Kühlung oberhalb der Presse lediglich eine Abnahme des Wassergehaltes um 1 % feststellen und glaubt, daß die zum Teil in

der Literatur gegebenen Nachverdampfungen in Höhe von 2 bis 3 % Irrtümern entstammen müssen. Sind doch dann z. B. bei einem Sinken des Wassergehaltes von 18 auf 15 % auf 1 kg Trockenkohle über 24 g Wasser zu verdampfen, die allein theoretisch 14,5 W.E. verbrauchen würden, während selbst bei einer außerordentlich hohen Rückkühlung um 50° höchstens 17 W.E. verfügbar sind. Denn so lange die Kohle wärmer als ihre Umgebung ist, kann sie von dort Wärme nicht aufnehmen, muß also die Nachverdampfung aus der in ihr aufgespeicherten Wärmemenge bestreiten. Nun wird aber von dieser Wärme ein erheblicher Teil durch Leitung und Strahlung an die Umgebung abgegeben; die Verdampfung selbst aber kann weiter nur unter gleichzeitiger Erwärmung der den Wasserdampf aufnehmenden Luft vor sich gehen, und da die Luft mit einer verhältnismäßig geringen Temperatur abzieht, ist der Wärmeverbrauch entsprechend hoch. Es dürfte deshalb die beobachtete Abnahme des Wassergehaltes um etwa 1 % das Richtige treffen.

Dagegen ist es zweifellos zu empfehlen, diese verfügbare Wärme nach Möglichkeit zur Verdampfung auszunutzen. Es kann dies geschehen, indem man Luft im Gegenstrom über das möglichst fein verteilte Trockengut strömen läßt. Es wird dann das bereits am meisten abgekühlte Material mit trockner Luft in Berührung gebracht, die also noch bei niedriger Temperatur eine erhebliche Kühlwirkung entwickeln kann; die Luft erwärmt und sättigt sich beim Vorschreiten immer mehr und kann angenähert mit der Temperatur ausziehen, welche die Trockenkohle beim Verlassen des Trockenapparates besaß. Hier ist dann auch keine Gefahr vorhanden, daß aus der Luft unzeitig Wasser ausgeschieden wird; die Verdampfung geschieht mit dem geringsten Wärmeaufwand und unnötige Abkühlung ist vermieden. Als geeignet erscheint eine dem Zellentrockner ähnliche Anordnung, die eine große Berührungsfläche zwischen Kohle und Luft bietet und deshalb eine geringe Luftgeschwindigkeit erlaubt.

Vom thermischen Standpunkt aus erscheint die Anordnung, das Trockengut wassergekühlte Röhren durchlaufen zu lassen, falsch, da hier die zur Nachverdampfung verfügbare Wärme nutzlos vernichtet wird.

In neuester Zeit gewinnt die pneumatische Förderung der Trockenkohle Eingang in der Brikettfabrikation, da ihr neben den sonstigen unleugbaren Vorteilen auch eine große Kühlwirkung zugeschrieben wird. Das ist auch durchaus verständlich. Entsprechend dem erzeugten Vakuum steigert sich die Verdampfungsgeschwindigkeit

keit der heißen und von ungesättigter Luft rings umgebenen Kohlenkörner und trägt zur schnellen Abkühlung bei. Die Luft streicht in großer Geschwindigkeit an den einzelnen voneinander getrennten Körnchen vorüber; denn das Antriebsmittel ist ja der Stoß der Luft gegen die sich langsamer bewegendenden festen Teilchen, sie umspült die Körner ringsum, so daß deren gesamter Umfang zur wirksamen Kühlfläche wird. Die Wärme wird in lebhaftester Weise entzogen und zugleich verhindert, daß Schichten höherer Sättigung an den Körnern haften bleiben und die Verdampfung erschweren. Aber auch hier wird die Wärme in der Hauptsache zur Erwärmung von Luft verwendet werden müssen, und es ist deshalb durchaus nicht auffallend, daß die Luft beim Passieren von Naßfiltern noch eine erhebliche Verdunstungsfähigkeit entwickelt.

Den großen Vorteilen steht nun der unleugbar außerordentlich hohe Kraftverbrauch gegenüber. Er wird aber lediglich durch die Größe der größten vorhandenen Körner bestimmt, die gefördert werden müssen. Wo es gelingt, die Kohle in einem hohen Grade zerkleinert dem Saugrüssel zuzuführen, wird sich das Verfahren auch wirtschaftlich vorteilhaft erweisen; bei Einführung der Zwischenzerkleinerung, wie sie bei stufenweiser Trocknung aus andern Gründen nötig und nützlich ist, wird der Kraftverbrauch der pneumatischen Förderung ein sehr geringer, die Kühlwirkung zugleich eine hohe werden.

Für eine eigentliche Wiedergewinnung von Wärme bleibt also nach vorstehendem lediglich die in der Abluft enthaltene Wärmemenge verfügbar, als Objekte der Wärmeübertragung kommen Rohgut, Luft und Wasser in Betracht. Das letztere scheidet von vornherein aus, da man zu Vorwärmung des Speisewassers eine viel bequemere und wirksamere Wärmequelle in den Abgasen der Kesselheizung besitzt.

Die Wärmeübertragung aus dem Wrasen an das Rohgut ist in mancherlei Weise versucht worden. So durch die Führung der Luft im Gegenstrom, die jetzt noch mancherorts zu dem Zwecke üblich ist, zugleich mit dem sich an der kalten Rohkohle niederschlagenden Kondensat auch den Staub aus der Abluft zu entfernen. Ursprünglich glaubte man, wie noch jetzt vielfach im Trockenfach, daß die Erniedrigung der Temperatur und Erhöhung der Sättigung auch eine größere Wirtschaftlichkeit gewährleisten würde. Nun ist aber zunächst nicht anzunehmen, daß ein Kondensieren erst dann eintritt, wenn der Taupunkt erreicht ist, einmal schon deshalb, weil in Wirklichkeit die Temperatur der Luft

nie durchaus die gleiche ist, vielmehr die gerade in Berührung mit dem Trockengut befindliche stärker abgekühlt ist als der Durchschnitt, dann aber auch, weil unter der Einwirkung der gleichzeitig stattfindenden Wärmezufuhr die freie Spannung nicht Null sein kann.

Sieht man aber auch hiervon ab, so kann eine weitere Ersparnis nicht erzielt werden, wenn einmal der Taupunkt erreicht ist. So entführt die gesättigte Abluft bei 74 °, wenn sie mit 7 g Wassergehalt und 15 ° Wärme in den Apparat eintrat,

$$\frac{243,5 - 7,8}{0,3524} = 670 \text{ W.E.}$$

auf 1 kg verdampftes Wasser; tritt sie mit 73 ° gesättigt aus, so entführt sie

$$\frac{228,7 - 7,8}{0,3294} = 671 \text{ W.E.}$$

und bei 70 °

$$\frac{190,7 - 7,8}{0,2706} = 676 \text{ W.E.}$$

mit sich.

Der Wirkungsgrad wird also immer schlechter, selbst wenn man die Luft als gesättigt annimmt. Hierzu kommen noch die mit der Wasserabscheidung verbundenen Unzuträglichkeiten. Dagegen sind die übrigen Vorteile, die man dem Gegenstromprinzip in Anlehnung an die reine Heizung zuschreibt, nicht so beträchtlich, als es scheinen kann. Man hat zwar bei Eintritt der Luft am Auslauf des Trockengutes hohe freie Spannung und infolgedessen kühle Endtemperaturen, am anderen Ende des Trockners aber wird die Temperatur des Trockengutes bei der herrschenden geringen freien Spannung und infolge der mit der Kondensation verbundenen Wärmeübermittlung jäh in die Höhe schnellen und dadurch das erst errungene größere Wärmegefälle hier zum größten Teile wieder wettmachen.

Man hat nun weiter versucht, die Abwärme des Wrasens dadurch an das Rohgut zu übertragen, daß eine direkte Berührung nicht stattfindet, sondern eine Wand zwischengeschaltet wird, durch deren Vermittlung die Wärmeübertragung geschieht. Die Nachteile des schlechteren Wirkungsgrades der Abluft und der Verschmierung werden also nicht eintreten.

An sich ist diese Maßnahme wirkungsvoll. Rechnet man mit einer spezifischen Wärme der Rohkohle von 0,66 und mit rund 2 kg Rohgut auf 1 kg zu verdampfendes Wasser, so würde die Erwärmung des Rohgutes um 1 ° eine Verbesserung der Wärmebilanz um

1,32 W.E. ergeben, bei 20° Erwärmung, also von etwa 8° auf 28°, ein Plus von 26,4 W.E., ein ganz beträchtlicher Effekt.

Da man von der Wärmeleitfähigkeit der Zwischenwand aus Blech absehen kann, würde die Wärmedurchgangszahl sich bestimmen zu

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2},$$

wobei

$$\alpha_1 = 0,72 (33 + \vartheta - t)$$

die Wärmeübergangszahl der Kohle,

$$\alpha_2 = 2 + 10\sqrt{v}$$

die Wärmeübergangszahl der Luft sein würde. Nimmt man $\vartheta - t$ zu rund 70° und eine Luftgeschwindigkeit von 4 m an, so ist

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{103} + \frac{1}{22}; \quad k = 18.$$

Unter den Verhältnissen von Millygrube (100° und 74° Taupunkt) kann 1 kg Luft bis zum Taupunkt 10,2 W.E. abgeben, so daß bei 2,84 kg Luft pro 1 kg verdampftes Wasser 30,2 W.E. verfügbar sind. Die Luft würde also bei einer Abgabe von insgesamt 26,4 W.E. nicht ganz auf den Taupunkt abgekühlt werden, wohl aber würde an den Wänden eine Kondensation eintreten.

Zur Berechnung der erforderlichen Heizfläche dient die Formel („Hütte“, I, S. 309):

$$Q = Fk \left(\frac{t_1' + t_1''}{2} - \frac{t_2' + t_2''}{2} \right) z$$

nebst der zugehörigen Verbesserung. (z ist gleich 1.)

$$F = \frac{26,4}{18(88 - 18)} \cdot 1 = 0,021 \text{ qm.}$$

Da ein Apparat bei etwa 750 qm Heizfläche stündlich etwa 3900 kg Wasser verdampft, wäre also eine Gesamtfläche von 82 qm erforderlich. Man erkennt, daß das einfache Verfahren, die Kohle vom Wrasen umströmte Rutschen passieren zu lassen, nur eine sehr geringe Wirkung haben kann.

Will man die Wärmequelle in dieser Weise ausnutzen, so müssen die der Berechnung zugrunde gelegten Bedingungen erfüllt sein: Die Geschwindigkeit der Luft muß 4 m betragen und die Reinigung der von der Luft bestrichenen Fläche muß leicht zu bewirken sein, da die Entstauber den Staub nicht vollkommen abscheiden können und infolgedessen an der feuchten Heizwand eine Verschmutzung eintreten wird. Aus diesen Gründen scheint es nicht tunlich, den Vorwärmer in der Art der rotierenden Röhrentrockner

oder der Tellertrockner auszubilden, sondern als Aggregat von Heizschnecken, in denen die Kohle längs bewegt wird, während der Wrasen auf- und absteigend zu führen ist.

Da eine Trocknung bei so niedriger Temperatur sehr unwirtschaftlich ist, muß entweder die Luft von der Kohle möglichst abgehalten oder hinterher in den eigentlichen Trockner eingeführt werden.

Als Heizfläche kann nur die von Kohle berührte gelten, die Schneckenrohre sind also möglichst gefüllt zu halten. Mit einem derartigen Apparat kann man für den angezogenen Fall in der Stunde $26,4 \cdot 3900 = 103000$ W.E. gewinnen, und rechnet man, daß 1 kg verfeuerte Kohle, am Trockenapparat gemessen, 1200 W.E. abgeben kann, so werden in der Stunde 8,6 kg Kohlen, bei 300 Arbeitstagen und 24 stündigem Betrieb 610000 kg Kohlen erspart; rechnet man ferner mit einem (hohen) Wert von 15 Mk. pro Doppelwaggon am Werk, so wäre das im Jahre 915 Mk. Ersparnis auf einen Trockenapparat, die vielleicht neben Amortisation, Verzinsung und Betriebskosten einen kleinen Verdienst lassen werden, zumal wenn man die Erwärmung noch weiter treiben würde, denn es wachsen wohl die Heizflächen schneller, als der Mehrwärme entsprechen würde, aber die Ausgaben für den Antriebsmechanismus werden nicht viel höher werden. Immerhin wird man kaum annehmen können, daß die mit dieser Einrichtung verbundene Komplikation des Betriebes durch die Vorteile ausgeglichen wird, solange nicht der Wert der Kohle am Werk noch wesentlich höher ist.

So ist denn die weitere Frage zu untersuchen, welche Erfolge die Vorwärmung der Luft versprechen kann.

Es ist selbstverständlich, daß man ein möglichst großes Wärmegefälle zwischen Frischluft und Abluft schaffen wird, daß man also beide im Gegenstrom zueinander längs der Heizflächen führt; daß man ferner auf die Vorwärmung der Luft an der Mantelfläche der Trockner verzichtet und der Rückgewinnungsanlage lieber die Luft kühler zuführt, also bei 8° Außentemperatur mit etwa 15° , wobei es ja unbenommen bleibt, die Mantelfläche der Apparate zur weiteren Erwärmung der Frischluft, nachdem diese an der Abluft vorgewärmt ist, weiter zu benutzen.

Schon aus der großen Heizfläche, die bei der Vorwärmung der Kohle benötigt wird, kann geschlossen werden, daß sehr beträchtliche Flächen auch hier in Frage kommen, daß man also auf möglichst billige Herstellung bedacht sein muß. Man wird also auf das teure Gußeisen von vornherein verzichten müssen und Blechröhren in Aussicht nehmen, die zur Verringerung der außerordentlich heftigen

Rostbildung infolge des kondensierenden luft- und staubhaltigen Wassers mit einem Überzug von Zink oder dergl. versehen sein müssen. An einem derartigen Kühler müßte jede Schraube und Niete vermieden werden, da an ihnen der schützende Überzug nicht kontrolliert werden und der Rost, an ihnen beginnend, fortschreiten kann, und da alle solche Verbindungen in der Ausführung viel zu teuer ausfallen würden. Man hat in der Verbindung von Eisen und Beton das Mittel, um solche Röhrensysteme ohne die geschilderten Nachteile fertigen zu können, indem man die Rohre in passenden Formen mit Zement abdichtet, die Wände aber möglichst in Rabitzkonstruktion ausführt. Es ist empfehlenswert, die Außenseite der Rohre von der Abluft umspülen zu lassen, da nur so der schützende Überzug mit genügender Zuverlässigkeit kontrolliert werden kann. Und man wird die Rohre senkrecht in Reihen anordnen, in denen die Zwischenräume zwischen den einzelnen Rohren gering sind, während zwischen den Reihen ein größerer Zwischenraum von etwa 10 cm bestehen bleiben muß, um mit Spritzrohren oder dergl. eine Säuberung vornehmen zu können, die auch durch Anbringung von Brauserohren während des laufenden Betriebes vorzusehen ist.

Es seien wieder die Verhältnisse von Millygrube angenommen (100° und 74° Taupunkt); da die Wärmerückgewinnungsanlage nicht unmittelbar neben dem Abzug des Wrasens eingebaut werden kann, wie auch bei der Rückführung der Frischluft Wärme verloren geht, wurde zum Ausgleich dieser Verluste angenommen, daß der Wrasen mit 95° in den Kühler eintritt. Um nicht allzu große Heizflächen zu erhalten, ist als Endtemperatur der Frischluft 90° eingesetzt.

Da die Menge trockener Luft in der Frischluft und Abluft dieselbe ist, können unmittelbar die Werte der Tabelle 1 für 1 kg Luft benutzt werden. Für die bei 74° gesättigte Luft ist $c_r = 0,409$. Sie kann also bei der Abkühlung von 95° auf 74° 8,6 W.E. abgeben, die das gleiche Quantum Frischluft mit $c_r = 0,2407$ um 36° erwärmen können. Während die Temperatur der Abluft von 95° auf 74° fällt, steigt die der Frischluft von 54° auf 90°. Um letztere nun weiter von 15° auf 54° zu erwärmen, sind $0,2407 \cdot 39 = 9,4$ W.E. erforderlich, die geleistet werden, wenn die Temperatur der Abluft von 74° auf 73,3° gesunken ist.

Nimmt man an, daß eine der Luftarten mit 4 m, die andere mit 2 m Geschwindigkeit das System durchströmt, so berechnet sich die Wärmedurchgangszahl k zu:

$$\frac{(2 + 10\sqrt{2})(2 + 10\sqrt{4})}{2 + 10\sqrt{2} + 2 + 10\sqrt{4}} = 9.$$

Eine gleichzeitige Wärmeübermittlung durch Strahlung kann nicht angenommen werden, da die Rohrwände annähernd gleiche Temperatur besitzen.

Es berechnet sich die Heizfläche, wie früher angegeben, zu

$$F_1 = \frac{8,6}{9(84,5 - 72)} \cdot \frac{1}{1,154} = 0,0663 \text{ qm},$$

$$F_2 = \frac{9,4}{9(73,7 - 35,5)} \cdot \frac{1}{1,1} = 0,0242 \text{ „}$$

$$F = 0,0905 \text{ qm.}$$

Diese Fläche dient zur Wiedergewinnung der Wärme aus 1 kg Luft, wobei auf eine stündlich gewonnene Wärmeeinheit 0,005 qm entfallen. Auf 1 qm Heizfläche des Trockners sind erforderlich: $\frac{0,0905 \cdot 22,9}{2,09} = 1 \text{ qm Fläche der Rückgewinnungsanlage.}$ Auf 1 kg

verdampftes Wasser werden rund 50 W.E. zurückgewonnen, so daß sich unter den angenommenen Umständen die Gesamtaufwendung auf 660 W.E. stellen würde. Ist die ursprüngliche Wärmebilanz noch besser, wird das Endergebnis um ebensoviel günstiger. Die jährliche Ersparnis würde sich unter den früheren Annahmen pro Trockenapparat auf ungefähr 1770 Mk. stellen, so daß bei den allerdings sehr hoch angenommenen Gestehungskosten der Kohle die Ausführung lohnen würde, wenn eine solche Wärmerückgewinnungsanlage zu etwa 10000 Mk. erbaut werden könnte. Die Betriebskosten werden sehr gering sein und hauptsächlich in dem Kraftbedarf der Ventilatoren bestehen.

Wenn nun aber die Bedingung der leichten Zugänglichkeit erreicht werden soll, so stellen sich der Ausführung recht erhebliche Schwierigkeiten entgegen, die hauptsächlich in den der Rechnung zugrunde gelegten Luftgeschwindigkeiten liegen.

1 kg Frischluft nimmt beim Eintritt ein Volumen von 0,825 cbm, beim Austritt ein solches von 1,010 cbm ein und dementsprechend die Abluft 1,668 und 1,271 cbm; infolgedessen deckt 1 kg stündlich einen Querschnitt von 0,0572 und 0,070 qcm bei Frischluft und 4 m Geschwindigkeit, 0,232 und 0,176 qcm bei Abluft und 2 m Geschwindigkeit. Rechnet man das Mittel, denn man kann durch Zahl oder Dimensionierung der Rohre während des ganzen Weges die Geschwindigkeit gleich groß halten, so benötigt die Wärmerückgewinnung an einem Trockenapparat einen Querschnitt von 502,5 qcm für Frischluft und 1610 qcm für Abluft. Nimmt man als zweckmäßige lichte Rohrweite 10 cm an, so würde die Frischluft in etwa

sieben Rohren zu führen sein, die aber, um die nötige Heizfläche zu erhalten, je $\frac{750}{7 \cdot 0,314} = 340$ m lang sein müßten. Bei 5 m Rohrlänge

müßte also die Luft 68 solcher Rohre hintereinander passieren, der Kanal würde etwa 14 m lang und etwas über 1 m breit werden, wenn die Rohre senkrecht stehen. Dagegen ließe sich die erforderliche Geschwindigkeit der Abluft nicht erreichen, denn schon der Spalt zwischen zwei Rohren mit etwa 5 cm Breite und 5 m Länge würde 2500 qcm betragen, während nur 1610 qcm vorhanden sein dürften.

Dies ließe sich umgehen, wenn man die Abluft mehrerer Trockner, was ja auch aus sonstigen Gründen empfehlenswert wäre, vereinigte, so daß z. B. bei zehn Trocknern 16100 qmm Querschnitt gedeckt wären; man würde dann bei sieben Rohren nebeneinander ziemlich auf die verlangte Geschwindigkeit kommen; die Kanallänge würde 140 m betragen und könnte durch Hin- und Zurückführen nebeneinander erreicht werden. Besser wird man freilich tun, diese Geschwindigkeit künstlich zu erzeugen, indem man die Luft in einzelnen Abteilungen dasselbe Rohr unter dem Einfluß eines Ventilators mehrmals passieren läßt, wobei immer nur ein Teil unter der Wirkung des Hauptventilators der nächsten Abteilung zuströmen würde. Die Teilung in einzelne kleinere Abteilungen ist notwendig, um nicht durch die Mischung von Luft verschiedener Temperatur das Wärmegefälle zu verringern.

Ähnliches gilt auch von der Frischluft. Zwar ist die erforderliche Depression nicht allzu hoch, pro 100 m Leitungslänge 2,5 cm Wassersäule, also bei 340 m 8,5 cm, wozu dann noch die Widerstände in den Sammelkammern zwischen den einzelnen Rohren kommen; man wird aber diese Depressionen möglichst gering halten, um nur geringe Ansprüche an die Dichtheit der Verbindungen stellen zu müssen, und deshalb auch lieber, wenigstens zum Teil, das mehrmalige Durchströmen derselben Rohre vorsehen.

Ob es nun möglich ist, eine solche Wärmerückgewinnungsanlage wirklich durchzuführen, dürfte in der Hauptsache von dem Preise der Rohre abhängen. Da sie mechanischen Einwirkungen nicht ausgesetzt sind, brauchte die Wandstärke nur eine geringe zu sein, wenn nur der schützende Überzug dicht genug ist, um das Rosten zu verhindern. Man könnte auch durch weitere Erhöhung der Geschwindigkeiten die Heizfläche noch weiter herunterdrücken, allerdings bei gleichzeitig stark steigendem Kraftverbrauch.

Eine erhöhte Bedeutung würde der Rückgewinnungsanlage zukommen, wenn im Interesse der möglichsten Ausnutzung des Dampfes

zu Kraftzwecken die Heizdampfspannung auf 1,5 Atm. oder selbst annähernd auf atmosphärischen Druck herabgesetzt werden soll. Will man dann die erforderliche größere Heizfläche durch Hintereinanderschaltung mehrerer Trockner und hohe Füllung wieder einbringen, so entsteht, wie bereits erwähnt, die Schwierigkeit, das erforderliche Luftquantum gleichzeitig durch die Heizrohre zu befördern. Wollte man die Luft nach dem Durchgange durch jedes Rohr ins Freie entlassen und dem nächsten Rohr wieder Frischluft zuführen, so würde man die Trocknung zwar außerordentlich fördern, dagegen sehr unwirtschaftlich arbeiten. Nun ist es aber unter den angenommenen Verhältnissen von Millygrube, und bei der zu erwartenden höheren Sättigung noch mehr, möglich, nicht nur das gleiche, sondern sogar das dreifache Luftquantum vorzuwärmen, ohne daß ein schlechterer Wirkungsgrad eintritt, wenn man nur die Endtemperatur etwa von 90° auf 80° herabsetzt. Da man die einzelnen Rohrlängen so dimensionieren kann, daß die Abluft des ersten Apparates unter, die des zweiten mit 80° austritt, so gewinnt man die in der Rückgewinnung verloren gegebene Wärmemenge des letzten Trockners zum großen Teil in der Übergangstemperatur im ersten Trockner wieder.

Man erreicht weiter den Vorteil, daß man die Heizrohre sehr viel besser ausnutzen kann und in ihnen ein bedeutend besseres Wärmegefälle herstellt; denn da die freie Spannung mit der Wärmezufuhr und Kohlentemperatur durch die bekannte Formel verknüpft ist, muß die Temperatur der Kohle so weit heruntergehen, bis das Gleichgewicht wieder hergestellt ist, und die ursprüngliche Temperatur kann erst dann wieder erreicht werden, wenn die ursprüngliche Sättigung wieder vorhanden ist. Eine genauere Nachrechnung ist aber nicht möglich, da infolge des auch hier eintretenden Nachhinkens der freien Spannung nicht ermittelt werden kann, bis zu welcher Temperatur die Abkühlung reicht.

Im allgemeinen aber wird man sagen können, daß — im Einklang mit dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre — die Aussichten auf große Erfolge bei der Rückgewinnung der Wärme nicht günstig sind.

Es liegt viel näher, die Trockenapparate selbst so zu bauen, daß eine möglichst hohe Sättigung erreicht werden kann, und durch stete Betriebskontrolle dafür zu sorgen, daß diese Sättigung in Wirklichkeit auch erzielt wird.

Anhang. I.

| t_s | Spannung des ges. Wasserdampfes in mm Q.S. | Dampfdichte | Wärmeinhalt von 1 kg Dampf in W. E. | 1 kg Luft enthält bei Sättigung Dampf | | Wärmeinhalt von 1 kg Luft + Dampf gesättigt | Wärmezuwachs auf 1° Temperaturerhöhung | | $\frac{1000 v}{273 + \theta}$ | $\frac{760}{760}$ |
|-------|--|-------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------|---|--|-----------|-------------------------------|-------------------|
| | S_1 | γ | i'' in W. E. | d in Gramm | | J in W. E. | c_p in W. E. | | | |
| -20 | 0,927 | 0,00106 | 585,0 | 0,76 | | -4,3 | 0,2379 | | 2,835 | |
| -15 | 1,400 | 0,00157 | 587,3 | 1,15 | | -2,9 | 0,2380 | | 2,837 | |
| -10 | 2,093 | 0,00232 | 589,7 | 1,72 | | -1,3 | 0,2383 | | 2,840 | |
| -5 | 3,113 | 0,00350 | 591,9 | 2,56 | Differenz | +0,2 | 0,2387 | Differenz | 2,844 | Differenz |
| 0 | 4,600 | 0,00488 | 594,7 | 3,80 | | 2,2 | 0,2394 | | 2,849 | 2 |
| 1 | 4,940 | 0,00521 | 595,2 | 4,08 | 0,28 | 2,5 | 0,2395 | 1 | 2,851 | 1 |
| 2 | 5,302 | 0,00558 | 595,6 | 4,38 | 0,30 | 2,9 | 0,2396 | 1 | 2,852 | 1 |
| 3 | 5,687 | 0,00596 | 596,1 | 4,70 | 0,32 | 3,3 | 0,2398 | 2 | 2,853 | 2 |
| 4 | 6,097 | 0,00637 | 596,5 | 5,04 | 0,34 | 3,8 | 0,2399 | 1 | 2,855 | 2 |
| 5 | 6,534 | 0,00680 | 597,1 | 5,41 | 0,37 | 4,4 | 0,2401 | 2 | 2,857 | 1 |
| 6 | 6,998 | 0,00726 | 597,5 | 5,79 | 0,38 | 4,9 | 0,2403 | 2 | 2,858 | 2 |
| 7 | 7,492 | 0,00775 | 598,0 | 6,21 | 0,42 | 5,4 | 0,2405 | 2 | 2,860 | 2 |
| 8 | 8,017 | 0,00826 | 598,5 | 6,65 | 0,44 | 5,9 | 0,2407 | 2 | 2,862 | 2 |
| 9 | 8,574 | 0,00880 | 598,9 | 7,11 | 0,46 | 6,4 | 0,2409 | 2 | 2,864 | 2 |
| 10 | 9,165 | 0,00938 | 599,4 | 7,61 | 0,50 | 6,9 | 0,2411 | 2 | 2,867 | 3 |
| 11 | 9,792 | 0,00998 | 600,0 | 8,14 | 0,53 | 7,5 | 0,2414 | 3 | 2,869 | 3 |
| 12 | 10,457 | 0,01062 | 600,4 | 8,70 | 0,56 | 8,1 | 0,2416 | 2 | 2,872 | 2 |
| 13 | 11,162 | 0,01130 | 600,8 | 9,29 | 0,59 | 8,7 | 0,2419 | 3 | 2,874 | 3 |
| 14 | 11,908 | 0,01202 | 601,3 | 9,93 | 0,64 | 9,3 | 0,2422 | 3 | 2,877 | 3 |
| 15 | 12,699 | 0,01277 | 601,8 | 10,61 | 0,68 | 10,0 | 0,2425 | 3 | 2,880 | 3 |
| 16 | 13,536 | 0,01350 | 602,3 | 11,3 | 0,69 | 10,6 | 0,2429 | 4 | 2,883 | 4 |
| 17 | 14,421 | 0,01440 | 602,7 | 12,1 | 0,8 | 11,3 | 0,2433 | 4 | 2,887 | 4 |
| 18 | 15,357 | 0,01528 | 603,1 | 12,9 | 0,8 | 12,0 | 0,2437 | 4 | 2,891 | 4 |
| 19 | 16,346 | 0,01621 | 603,6 | 13,7 | 0,8 | 12,8 | 0,2441 | 4 | 2,895 | 4 |
| 20 | 17,391 | 0,01719 | 604,1 | 14,6 | 0,9 | 13,6 | 0,2445 | 4 | 2,899 | 4 |
| 21 | 18,495 | 0,01822 | 604,6 | 15,6 | 1,0 | 14,4 | 0,2449 | 5 | 2,903 | 4 |
| 22 | 19,659 | 0,01931 | 605,1 | 16,6 | 1,0 | 15,3 | 0,2454 | 5 | 2,907 | 5 |
| 23 | 20,888 | 0,02044 | 605,6 | 17,6 | 1,2 | 16,1 | 0,2459 | 6 | 2,912 | 5 |
| 24 | 22,184 | 0,02164 | 606,1 | 18,8 | 1,2 | 17,0 | 0,2465 | 5 | 2,917 | 6 |
| 25 | 23,550 | 0,02290 | 606,5 | 20,0 | 1,2 | 18,0 | 0,2470 | 6 | 2,923 | 6 |
| 26 | 24,988 | 0,02421 | 606,9 | 21,2 | 1,4 | 19,0 | 0,2476 | 6 | 2,929 | 6 |
| 27 | 26,505 | 0,02560 | 607,4 | 22,6 | 1,4 | 20,0 | 0,2483 | 7 | 2,935 | 6 |
| 28 | 28,101 | 0,02705 | 607,9 | 24,0 | 1,4 | 21,1 | 0,2489 | 6 | 2,941 | 7 |
| 29 | 29,782 | 0,02858 | 608,3 | 25,4 | 1,6 | 22,3 | 0,2496 | 7 | 2,948 | 7 |
| 30 | 31,548 | 0,03018 | 608,8 | 27,0 | 1,7 | 23,6 | 0,2504 | 8 | 2,955 | 8 |
| 31 | 33,406 | 0,03185 | 609,3 | 28,7 | 1,7 | 24,9 | 0,2512 | 8 | 2,963 | 8 |
| 32 | 35,359 | 0,03360 | 609,7 | 30,5 | 1,8 | 26,2 | 0,2520 | 9 | 2,971 | 8 |
| 33 | 37,411 | 0,03544 | 610,2 | 32,3 | 2,0 | 27,5 | 0,2529 | 10 | 2,979 | 9 |
| 34 | 39,565 | 0,03736 | 610,7 | 34,3 | 2,1 | 29,0 | 0,2539 | 10 | 2,988 | 9 |
| 35 | 41,827 | 0,03937 | 611,1 | 36,4 | 2,2 | 30,6 | 0,2549 | 10 | 2,997 | 10 |
| 36 | 44,201 | 0,04148 | 611,6 | 38,6 | 2,3 | 32,2 | 0,2559 | 11 | 3,007 | 11 |
| 37 | 46,691 | 0,04368 | 612,0 | 40,9 | 2,4 | 33,8 | 0,2570 | 11 | 3,018 | 11 |
| 38 | 49,302 | 0,04597 | 612,5 | 43,3 | 2,6 | 35,6 | 0,2581 | 13 | 3,029 | 12 |
| 39 | 52,039 | 0,04837 | 613,0 | 45,9 | 2,8 | 37,4 | 0,2594 | 13 | 3,041 | 12 |
| 40 | 54,906 | 0,05088 | 613,5 | 48,7 | 2,8 | 39,4 | 0,2607 | 14 | 3,053 | 13 |
| 41 | 57,910 | 0,05350 | 613,9 | 51,5 | 3,1 | 41,4 | 0,2621 | 15 | 3,066 | 14 |
| 42 | 61,055 | 0,05623 | 614,3 | 54,6 | 3,2 | 43,4 | 0,2636 | 15 | 3,080 | 15 |
| 43 | 64,346 | 0,05909 | 614,8 | 57,8 | 3,4 | 45,7 | 0,2651 | 16 | 3,095 | 16 |
| 44 | 67,790 | 0,06205 | 615,3 | 61,2 | 3,6 | 48,1 | 0,2667 | 17 | 3,111 | 16 |
| 45 | 71,391 | 0,06515 | 615,8 | 64,8 | 3,8 | 50,7 | 0,2684 | 18 | 3,127 | 17 |
| 46 | 75,158 | 0,06838 | 616,2 | 68,6 | 4,0 | 53,3 | 0,2702 | 19 | 3,144 | 18 |
| 47 | 79,093 | 0,07174 | 616,6 | 72,6 | 4,2 | 55,9 | 0,2721 | 21 | 3,162 | 19 |
| 48 | 83,204 | 0,07523 | 617,1 | 76,8 | 4,6 | 58,8 | 0,2742 | 21 | 3,181 | 21 |
| 49 | 87,499 | 0,07890 | 617,6 | 81,4 | 4,7 | 61,9 | 0,2763 | 23 | 3,202 | 22 |

| t_s | Spannung des ges. Wasser- dampfes in mm Q.S. | Dampf- dichte | Wärme- inhalt von 1 kg Dampf i'' in W. E. | 1 kg Luft enthält bei Sättigung Dampf | Wärmeinhalt von 1 kg Luft + Dampf ge- sättigt | Wärmezuwachs auf 1° Tempe- raturerhöhung | $\frac{1000 v}{273 + \theta}$ | $\frac{760}{760}$ |
|-------|--|------------------|---|--|--|--|-------------------------------|-------------------|
| | S_1 | γ | | d in Gramm | J in W. E. | c_p in W. E. | | |
| 50 | 91,982 | 0,08269 | 618,0 | 86,1 | 65,1 | 0,2786 | 3,224 | 23 |
| 51 | 96,661 | 0,08664 | 618,5 | 91,1 | 68,5 | 0,2810 | 3,247 | 24 |
| 52 | 101,543 | 0,09074 | 619,0 | 96,5 | 72,1 | 0,2835 | 3,271 | 25 |
| 53 | 106,636 | 0,09502 | 619,4 | 102,1 | 75,8 | 0,2862 | 3,296 | 28 |
| 54 | 111,945 | 0,09948 | 619,8 | 108,1 | 79,8 | 0,2890 | 3,324 | 29 |
| 55 | 117,478 | 0,10403 | 620,3 | 114,4 | 84,0 | 0,2921 | 3,353 | 30 |
| 56 | 123,244 | 0,10887 | 620,7 | 121,2 | 88,5 | 0,2953 | 3,383 | 32 |
| 57 | 129,251 | 0,11384 | 621,2 | 128,3 | 93,2 | 0,2986 | 3,415 | 35 |
| 58 | 135,505 | 0,11900 | 621,7 | 135,9 | 98,2 | 0,3022 | 3,450 | 37 |
| 59 | 142,015 | 0,12438 | 622,1 | 143,9 | 103,6 | 0,3060 | 3,487 | 39 |
| 60 | 148,791 | 0,12994 | 622,6 | 152,5 | 109,2 | 0,3101 | 3,526 | 41 |
| 61 | 155,839 | 0,13572 | 623,0 | 161,6 | 115,2 | 0,3146 | 3,567 | 44 |
| 62 | 163,170 | 0,14171 | 623,5 | 171,3 | 121,5 | 0,3193 | 3,611 | 47 |
| 63 | 170,791 | 0,14789 | 623,9 | 181,6 | 128,3 | 0,3242 | 3,658 | 50 |
| 64 | 178,714 | 0,15432 | 624,3 | 192,7 | 135,5 | 0,3294 | 3,708 | 54 |
| 65 | 186,945 | 0,16098 | 624,8 | 204,5 | 143,2 | 0,3350 | 3,762 | 58 |
| 66 | 195,496 | 0,16787 | 625,3 | 217,1 | 151,4 | 0,3410 | 3,820 | 62 |
| 67 | 204,376 | 0,17504 | 625,7 | 230,7 | 160,3 | 0,3475 | 3,882 | 66 |
| 68 | 213,596 | 0,18242 | 626,1 | 245,2 | 169,7 | 0,3545 | 3,948 | 70 |
| 69 | 223,165 | 0,19005 | 626,6 | 260,8 | 179,8 | 0,3620 | 4,018 | 77 |
| 70 | 233,093 | 0,19798 | 627,0 | 277,6 | 190,7 | 0,3701 | 4,095 | 82 |
| 71 | 243,393 | 0,20619 | 627,5 | 295,7 | 202,4 | 0,3787 | 4,177 | 89 |
| 72 | 254,073 | 0,21464 | 627,9 | 315,2 | 215,0 | 0,3878 | 4,266 | 96 |
| 73 | 265,147 | 0,22336 | 628,3 | 336,4 | 228,7 | 0,3980 | 4,362 | 105 |
| 74 | 276,624 | 0,23245 | 628,7 | 359,4 | 243,5 | 0,4090 | 4,467 | 113 |
| 75 | 288,517 | 0,24178 | 629,2 | 384,4 | 259,6 | 0,4209 | 4,580 | 124 |
| 76 | 300,838 | 0,25144 | 629,6 | 411,6 | 277,2 | 0,4339 | 4,704 | 136 |
| 77 | 313,600 | 0,26144 | 630,0 | 441,5 | 296,4 | 0,4481 | 4,840 | 149 |
| 78 | 326,811 | 0,27174 | 630,5 | 474,2 | 317,5 | 0,4637 | 4,989 | 164 |
| 79 | 340,488 | 0,28233 | 630,9 | 510,2 | 340,6 | 0,4808 | 5,153 | 181 |
| 80 | 354,643 | 0,29334 | 631,3 | 550,2 | 366,3 | 0,4998 | 5,334 | 202 |
| 81 | 369,287 | 0,30469 | 631,8 | 594,6 | 394,9 | 0,5211 | 5,536 | 226 |
| 82 | 384,435 | 0,31646 | 632,3 | 644,3 | 426,8 | 0,5448 | 5,762 | 252 |
| 83 | 400,101 | 0,32841 | 632,7 | 699,7 | 462,4 | 0,5714 | 6,014 | 285 |
| 84 | 416,298 | 0,34083 | 633,1 | 762,5 | 502,7 | 0,6017 | 6,299 | 326 |
| 85 | 433,041 | 0,35362 | 633,5 | 833,9 | 548,5 | 0,6358 | 6,625 | 373 |
| 86 | 450,301 | 0,36684 | 633,9 | 915,9 | 601,0 | 0,6746 | 6,998 | 443 |
| 87 | 468,175 | 0,38052 | 634,3 | 1013,3 | 663,4 | 0,7198 | 7,441 | 494 |
| 88 | 486,683 | 0,39448 | 634,7 | 1122,0 | 733,0 | 0,7726 | 7,935 | 575 |
| 89 | 505,060 | 0,40819 | 635,1 | 1248,3 | 813,8 | 0,8329 | 8,510 | 720 |
| 90 | 524,775 | 0,42319 | 635,6 | 1406,6 | 915,4 | 0,9084 | 9,230 | 881 |
| 91 | 545,133 | 0,43860 | 636,0 | 1600,3 | 1037 | 1,0007 | 10,111 | 1106 |
| 92 | 566,147 | 0,45454 | 636,4 | 1843,4 | 1195 | 1,1167 | 11,217 | 1421 |
| 93 | 587,836 | 0,47081 | 636,8 | 2155,7 | 1395 | 1,2660 | 12,638 | 1898 |
| 94 | 610,217 | 0,48757 | 637,2 | 2573,1 | 1662 | 1,4650 | 14,536 | 2660 |
| 95 | 633,305 | 0,50480 | 637,6 | 3158,0 | 2036 | 1,7190 | 17,196 | 3994 |
| 96 | 657,120 | 0,52246 | 638,1 | 4036,0 | 2598 | 2,1620 | 21,190 | 6659 |
| 97 | 681,683 | 0,54057 | 638,5 | 5500,3 | 3546 | 2,8580 | 27,849 | |
| 98 | 707,000 | 0,55992 | 638,9 | 8444,5 | 5416 | 4,2640 | | |
| 99 | 733,100 | 0,57870 | 639,3 | 17236 | 8795 | | | |
| 100 | 760,000 | 0,59876 | 639,7 | ∞ | ∞ | ∞ | | |

Anhang 2.

Verdunstungsversuch I.

Kohle vom Kohlenboden (gemischte Körnung).

| Zeit der Ablesung | | Temperatur des Raumes | Ablesung | Verstrichene Zeit | Gewichtsabnahme | Gewichtsabnahme auf |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|----------|-------------------|-----------------|---------------------|
| Tag | Stunde | | g | Stunden | g | 100 g |
| 30. XI. | Vorm. 10 ^h | 15,6 | 125 | 0 | 0 | 0 |
| | Nachm. 2 " | 14,6 | 124,9 | 4 | 0,1 | 0,14 |
| | " 6 " | 14,1 | 124 | 8 | 1 | 1,4 |
| 1. XII. | Vorm. 9 " | 14,2 | 120 | 23 | 5 | 7,05 |
| | Mittag 12 " | 14,0 | 118,5 | 26 | 6,5 | 9,15 |
| | Nachm. 6 " | 14,7 | 115,5 | 32 | 9,5 | 13,4 |
| 2. XII. | Vorm. 8 " | 14,1 | 111 | 46 | 14 | 19,7 |
| | Nachm. 2 " | 14,1 | 109 | 52 | 16 | 22,5 |
| | " 5 " | 14,2 | 108,5 | 55 | 16,5 | 23,3 |
| 3. XII. | Vorm. 9 " | 14,1 | 104,5 | 71 | 20,5 | 28,9 |
| 5. XII. | Nachm. 3 " | 13,9 | 95 | 125 | 30,0 | 42,3 |
| 6. XII. | Vorm. 10 " | 13,6 | 93 | 144 | 32,0 | 45,1 |
| 7. XII. | Mittag 12 " | 14,1 | 90,5 | 170 | 34,5 | 48,6 |
| 9. XII. | Nachm. 6 " | 16 | 88,5 | 224 | 35,5 | 50,0 |
| | | | | | 42,0 | 59,2 |

Bei 105° abgetrocknet

Gewicht des Bleches 54 g,

" der Kohle 71 "

Gesamtgewicht bei Beginn 125 g,

Verdunstungsversuch II.

a) Feinkörnige Kohle. b) Knorpel.

| Zeit der Ablesung | | Temperatur des Raumes | Ablesung | | Verstr. Zeit | Gewichtsabnahme auf 100 g | | |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|----------|---------|--------------|---------------------------|---------|---------------|
| Tag | Stunde | | Feinkorn | Knorpel | | Feinkorn | Knorpel | Knorpel korr. |
| | | | a | b | Stunden | a | b | b |
| 9. XII. | Nachm. 6 ^h | 16 | 104 | 80,5 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| 10. XII. | Vorm. 10 " | 14,4 | 93 | 72,5 | 16 | 22 | 16 | 21 |
| | Nachm. 4 " | 14,4 | 90 | 71 | 22 | 28 | 19 | 24 |
| | " 6 " | 14,4 | 89 | 71 | 24 | 30 | 19 | 24 |
| 12. XII. | Vorm. 10 " | 14,3 | 80 | 63 | 64 | 48 | 35 | 39 |
| | Nachm. 5 " | 14,3 | 78,5 | 62 | 71 | 51 | 37 | 41 |
| 13. XII. | Vorm. 9 " | 14,2 | 77,5 | 60 | 87 | 53 | 41 | 45 |
| | Nachm. 5 " | 14,3 | 77 | 60 | 95 | 54 | 41 | 45 |
| 14. XII. | Vorm. 10 " | 14,3 | 77 | 59 | 112 | 54 | 43 | 47 |
| | | | | | | 58,4 | 56,0 | 58,4 |

Bei 105° abgetrocknet

a)

Eingewogen: Feinkohle 50 g,

Blechgewicht 54 "

104 g.

b)

Knorpel 50 g,

Blechgewicht 30,5 g,

80,5 g.

10*

Verdunstungsversuch III.

Vergleich verschiedener Oberflächen.

Niedriges Gefäß:

Hohes Gefäß:

Gewicht des Gefäßes 25,7 g,
" der Kohle . 63,8 "

Gewicht des Gefäßes 29,25 g,
" der Kohle . 72 g,

89,5 g.

101,25 g.

Oberfläche 32 qcm.

Oberfläche 16 qcm.

| Zeit der Ablesung | | Temperatur des Raumes | Ablesung | | Verstr. Zeit in Stunden | Gewichtsabnahme auf 100 g | |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|--------------|-------------------------|---------------------------|--------------|
| Tag | Stunde | | Hohes Gefäß | Niedr. Gefäß | | Hohes Gefäß | Niedr. Gefäß |
| 14. XII. | Vorm. 10 ^h | 14,3 | 101 | 89,5 | 0 | 0 | 0 |
| 15. XII. | " 9 " | 14,3 | 98 | 87 | 23 | 4,2 | 3,9 |
| | Nachm. 6 " | 14,4 | 97 | 86 | 32 | 5,6 | 5,5 |
| 16. XII. | Mittag 12 " | 14,3 | 95 | 84 | 50 | 8,3 | 8,6 |
| | Nachm. 5 " | 14,3 | 95 | 83 | 55 | 8,3 | 10,2 |
| 17. XII. | Vorm. 9 " | 14,4 | 93 | 81 | 71 | 11,1 | 13,3 |

Anhang 3. Versuchsergebnisse.

I. Bei 3,5 Atmosphären absoluter Heißdampfspannung.

a) Hauptversuch, Montag, den 13. Dezember 1910.

Barometerstand
738 mm Q.S. (0°).

Zuschlag zu den Messungen
 $0,013 \cdot 22 = 3 \frac{0}{10}$.

Station X.

Kondensat 67,2 g,
Temperatur hinter dem
Kühler 19° 14 g,
Korrigiert 81,2 g,
83,6 "

Taupunkt 49,3°,
Spannung 88,8 mm Q.S.,
Spannung korrigiert 86,3 mm Q.S.,
Kohletemperatur 62°,
Wrasentemperatur 64°.

Station VIII.

Kondensat 119 g,
Temperatur hinter dem
Kühler 19° 14 "

Taupunkt 58,1°,
Spannung 136,1 mm Q.S.,
Spannung korrigiert 132,4 mm Q.S.,
Kohletemperatur 70°,
Wrasentemperatur 75/76°.

Station VI.

Kondensat 146 g,
Temperatur hinter dem
Kühler 19° 14 "

Taupunkt 61,3°,
Spannung 158 mm Q.S.,
Spannung korrigiert 153,2 mm Q.S.,
Kohletemperatur 76°,
Wrasentemperatur 86°.

Barometerstand
738 mm Q.S. (0°).

Zuschlag zu den Messungen
 $0,013 \cdot 22 = 3 \text{ ‰}$.

Station IV.

| | | |
|-----------------------|--------|----------------------------------|
| Kondensat | 178 g, | Taupunkt 64,5°, |
| Temperatur hinter dem | | Spannung 182,8 mm Q.S., |
| Kühler 19° | 14 " | Spannung korrigiert 178 mm Q.S., |
| | 192 g, | Kohletemperatur 82°, |
| Korrigiert | 198 " | Wrasentemperatur 95°. |

Station II.

| | | |
|-----------------------|--------|----------------------------------|
| Kondensat | 216 g, | Taupunkt 67,5°, |
| Temperatur hinter dem | | Spannung 209 mm Q.S., |
| Kühler 19° | 14 " | Spannung korrigiert 203 mm Q.S., |
| | 230 g, | Kohletemperatur 86,5°, |
| Korrigiert | 238 " | Wrasentemperatur 98°. |

Station I.

| | | |
|-----------------------|--------|----------------------------------|
| Kondensat | 276 g, | Taupunkt 70,4°, |
| Temperatur hinter dem | | Spannung 247 mm Q.S., |
| Kühler 19° | 14 " | Spannung korrigiert 240 mm Q.S., |
| | 290 g, | Kohletemperatur 86°, |
| Korrigiert | 299 " | Wrasentemperatur 102°. |

b) Kontrollversuch, Donnerstag, den 16. Dezember 1910.

Barometerstand
744 mm Q.S. (0°).

Zuschlag zu den Messungen
 $0,013 \cdot 16 = 2,1 \text{ ‰}$.

Station VIII.

| | | |
|-----------------------|--------|----------------------------------|
| Kondensat | 154 g, | Taupunkt 62,3°, |
| Temperatur hinter dem | | Spannung 165,5 mm Q.S., |
| Kühler 21° | 17 " | Spannung korrigiert 163 mm Q.S., |
| | 171 g, | Kohletemperatur 80°. |
| Korrigiert | 174 " | |

Station IV.

| | | |
|-----------------------|--------|----------------------------------|
| Kondensat | 246 g, | Taupunkt 69,4°, |
| Temperatur hinter dem | | Spannung 227,2 mm Q.S., |
| Kühler 21° | 17 " | Spannung korrigiert 221 mm Q.S., |
| | 263 g, | Kohletemperatur 90°. |
| Korrigiert | 269 " | |

II. Bei 3 Atmosphären absoluter Heizdampfspannung.

a) Hauptversuch, Dienstag, den 14. Dezember 1910.

Barometerstand
746 mm Q.S. (0°).

Zuschlag zu den Messungen
 $0,013 \cdot 14 = 1,8 \text{ ‰}$.

Station X.

| | | |
|-----------------------|-------|----------------------------------|
| Kondensat | 80 g, | Taupunkt 52,3°, |
| Temperatur hinter dem | | Spannung 103 mm Q.S., |
| Kühler 21° | 16 " | Spannung korrigiert 101 mm Q.S., |
| | 96 g, | Kohletemperatur 58°, |
| Korrigiert | 98 " | Wrasentemperatur 58°. |

Barometerstand
746 mm Q.S. (0⁰).

Zuschlag zu den Messungen
 $0,013 \cdot 14 = 1,8\%$

Station VIII.

Kondensat 110 g,
Temperatur hinter dem
Kühler 21⁰ 16 „
—
126 g,
Korrigiert 128 „

Taupunkt 57⁰,
Spannung 129 mm Q.S.,
Spannung korrigiert 126 mm Q.S.,
Kohletemperatur 64,5⁰,
Wrasentemperatur 72⁰.

Station VI.

Kondensat 160 g,
Temperatur hinter dem
Kühler 19⁰ 14 „
—
174 g,
Korrigiert 177 „

Taupunkt 62,6⁰,
Spannung 167,7 mm Q.S.,
Spannung korrigiert 165 mm Q.S.,
Kohletemperatur 72,5⁰,
Wrasentemperatur 83⁰.

Station IV.

Kondensat 179 g,
Temperatur hinter dem
Kühler 20⁰ 15 „
—
194 g,
Korrigiert 198 „

Taupunkt 64,5⁰,
Spannung 182,8 mm Q.S.,
Spannung korrigiert 179,5 mm Q.S.,
Kohletemperatur 75⁰,
Wrasentemperatur 86⁰.

Station II.

Kondensat 200 g,
Temperatur hinter dem
Kühler 20⁰ 15 „
—
215 g,
Korrigiert 219 „

Taupunkt 66,2⁰,
Spannung 197,4 mm Q.S.,
Spannung korrigiert 194 mm Q.S.,
Kohletemperatur 78⁰ (interpoliert),
Wrasentemperatur 94⁰.

Station I.

Kondensat 248 g,
Temperatur hinter dem
Kühler 20⁰ 15 „
—
263 g,
Korrigiert 268 „

Taupunkt 69,5⁰,
Spannung 228 mm Q.S.,
Spannung korrigiert 224 mm Q.S.,
Kohletemperatur 80⁰,
Wrasentemperatur 97⁰.

b) Kontrollversuch, Donnerstag, den 16. Dezember 1910.

Barometerstand
744 mm Q.S.

Zuschlag zu den Messungen
 $0,013 \cdot 16 = 2,1\%$

Station VIII.

Kondensat 174 g,
Temperatur hinter dem
Kühler 21⁰ 16 „
—
190 g,
Korrigiert 194 „

Taupunkt 64,2⁰,
Spannung 180,3 mm Q.S.,
Spannung korrigiert 177 mm Q.S.,
Kohletemperatur 76⁰.

Station IV.

Kondensat 260 g,
Temperatur hinter dem
Kühler 21⁰ 16 „
—
276 g,
Korrigiert 282 „

Taupunkt 70,3⁰,
Spannung 236 mm Q.S.,
Spannung korrigiert 231 mm Q.S.,
Kohletemperatur 85⁰.

III. Bei 2,5 Atmosphären absoluter Heizdampfspannung.

a) Hauptversuch, Mittwoch, den 15. Dezember 1910.

Barometerstand
745 mm Q.S. (0°).

Zuschlag zu den Messungen
 $0,013 \cdot 15 = 2 \text{ } ^\circ\text{ } _{10}$.

Station X.

| | | |
|-----------------------|--------|----------------------------------|
| Kondensat | 92 g, | Taupunkt 54,3°, |
| Temperatur hinter dem | | Spannung 113,5 mm Q.S., |
| Kühler 21° | 16 " | Spannung korrigiert 111 mm Q.S., |
| | 108 g, | Kohletemperatur 57°, |
| Korrigiert | 110 " | Wrasentemperatur —°. |

Station VIII.

| | | |
|-----------------------|--------|----------------------------------|
| Kondensat | 140 g, | Taupunkt 60,7°, |
| Temperatur hinter dem | | Spannung 152,3 mm Q.S., |
| Kühler 21° | 16 " | Spannung korrigiert 149 mm Q.S., |
| | 156 g, | Kohletemperatur 67°, |
| Korrigiert | 159 " | Wrasentemperatur 71°. |

Station VI.

| | | |
|-----------------------|--------|----------------------------------|
| Kondensat | 180 g, | Taupunkt 64,6°, |
| Temperatur hinter dem | | Spannung 183,7 mm Q.S., |
| Kühler 21° | 16 " | Spannung korrigiert 182 mm Q.S., |
| | 196 g, | Kohletemperatur 72°, |
| Korrigiert | 200 " | Wrasentemperatur 78°. |

Station IV.

| | | |
|-----------------------|--------|------------------------------------|
| Kondensat | 200 g, | Taupunkt 66,2°, |
| Temperatur hinter dem | | Spannung 197,3 mm Q.S., |
| Kühler 21° | 16 " | Spannung korrigiert 194,4 mm Q.S., |
| | 216 g, | Kohletemperatur 75°, |
| Korrigiert | 220 " | Wrasentemperatur —°. |

Station II.

| | | |
|-----------------------|----------|----------------------------------|
| Kondensat | 260 g, | Taupunkt 70,2°, |
| Temperatur hinter dem | | Spannung 235 mm Q.S., |
| Kühler 21° | 16 " | Spannung korrigiert 230 mm Q.S., |
| | 276 g, | Kohletemperatur 81°, |
| Korrigiert | 281,5 g. | Wrasentemperatur —°. |

Station I.

| | | |
|-----------------------|--------|----------------------------------|
| Kondensat | 274 g, | Taupunkt 71°, |
| Temperatur hinter dem | | Spannung 243 mm Q.S., |
| Kühler 21° | 16 " | Spannung korrigiert 238 mm Q.S., |
| | 290 g, | Kohletemperatur 81°, |
| Korrigiert | 296 " | Wrasentemperatur 87°. |

b) Kontrollversuch, Donnerstag, den 16. Dezember 1910.

Barometerstand
744 mm Q.S.

Zuschlag zu den Messungen
 $0,013 \cdot 16 = 2,1 \text{ } ^\circ\text{ } _{10}$.

Station VIII.

| | | |
|-----------------------|--------|----------------------------------|
| Kondensat | 160 g, | Taupunkt 62,8°, |
| Temperatur hinter dem | | Spannung 169,2 mm Q.S., |
| Kühler 21° | 16 " | Spannung korrigiert 166 mm Q.S., |
| | 176 g, | Kohletemperatur 71°. |
| Korrigiert | 179 " | |

Barometerstand
744 mm Q.S.

Zuschlag zu den Messungen
 $0,013 \cdot 16 = 2,1 \text{ }^{\circ}/_0$.

Station IV.

Kondensat 182 g,
Temperatur hinter dem
Kühler 21° 16 „
198 g,
Korrigiert 202 „

Taupunkt $64,8^{\circ}$,
Spannung 185,2 mm Q.S.,
Spannung korrigiert 181 mm Q.S.,
Kohletemperatur 73° .

IV. Bei 2 Atmosphären absoluter Heizdampfspannung.

Donnerstag, den 16. Dezember 1910.

Barometerstand
744 mm Q.S. (0°).

Zuschlag zu den Messungen
 $0,013 \cdot 16 = 2,1 \text{ }^{\circ}/_0$.

Station VIII.

Kondensat 180 g,
Temperatur hinter dem
Kühler 21° 16 „
196 g,
Korrigiert 201 „

Taupunkt $64,7^{\circ}$,
Spannung 184,4 mm Q.S.,
Spannung korrigiert 180 mm Q.S.,
Kohletemperatur 69° .

Station IV.

Kondensat 260 g,
Temperatur hinter dem
Kühler 21° 16 „
276 g,
Korrigiert 282 „

Taupunkt $70,3^{\circ}$,
Spannung 236 mm Q.S.,
Spannung korrigiert 231 mm Q.S.,
Kohletemperatur 76° .

6185-

18.

